



**Escola de Camins**  
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports  
UPC BARCELONATECH

## Rehabilitación de redes de alcantarillado mediante técnicas LID, usando SWMM5 en un caso real

Treball realitzat per:

**Miguel Valbuena Villalonga**

Dirigit per:

**Manuel Gómez Valentín**

Màster en:

**Enginyeria de Camins, Canals i Ports**

Barcelona, 19/09/2016

Departament d'Enginyeria Hidràulica, Marítima i Ambiental

**TREBALL FINAL DE MÀSTER**



---

## Resumen

A lo largo de los siglos XIX y XX las ciudades han apostado por una red artificial y enterrada de recolección de aguas residuales y de escorrentía pluvial. Sin embargo, a finales del siglo XX aparecieron nuevas técnicas y tendencias de modernización en el ámbito del drenaje pluvial urbano; estas abogan por la reducción de la escorrentía en vez de por su recolección, por medio del impulso de los procesos de retención e infiltración del agua de lluvia en terreno natural. Este proceso culmina con la entrada en escena de las técnicas de drenaje urbano sostenible.

Este trabajo se centra en el estudio de los beneficios e inconvenientes de este cambio de paradigma del drenaje urbano sobre localidades del litoral mediterráneo de la Península Ibérica. Se analiza en qué medida la incorporación de las técnicas de drenaje urbano sostenible a los sistemas de drenaje actuales representa una alternativa real para reducir los problemas de inundaciones que acechan estas áreas cada año. El estudio se particulariza en una cuenca urbana real del litoral mediterráneo. Se establecen cuatro escenarios de actuación y se cuantifican los beneficios obtenidos mediante el uso del software de cálculo hidráulico SWMM5. Posteriormente se comparan los costes asociados a cada uno de estos escenarios con el de una rehabilitación convencional de la red de alcantarillado.

Se ha demostrado que las técnicas de drenaje urbano sostenible han venido para quedarse como otra opción más que el técnico responsable del drenaje urbano debe considerar. A diferencia de como ciertos analistas defendían, las técnicas de drenaje urbano sostenible sí son capaces de tener un papel determinante ante eventos de lluvia torrencial. No obstante, en función de si se buscan resultados totales o si se busca un mayor aprovechamiento de la inversión realizada, el tipo de actuación más conveniente variará.

---

**Palabras clave:** Drenaje urbano sostenible, LID, SDUS, inundación, escorrentía, bio-retención, pavimento permeable, tejado verde, gestión integrada del agua

---

---

## Abstract

During the 19th and 20th centuries cities have used artificial and buried sewer networks in order to collect rainfall runoff and wastewater. Nonetheless, by the end of the 20th century, new techniques and trends of modernisation appeared in the field of urban storm drainage; these stand up for reducing the runoff instead of collecting it, by means of prioritizing the processes of retention and infiltration of rainwater into the natural soil. This process culminates with the breakthrough of sustainable urban drainage techniques.

This project focuses on the study of the benefits and disadvantages of this change of paradigm in urban drainage upon the localities of the Mediterranean littoral of the Iberian Peninsula. It is been analysed in what measure the incorporation of sustainable urban drainage techniques to present drainage systems represents a real alternative in order to reduce the inundation problems that disturb these areas every year. The study is particularised on a real urban catchment of the Mediterranean littoral. Four intervention scenarios are established and the obtained benefits in each one of them are quantified by using the hydraulic calculus software SWMM5. Subsequently, the associated costs to each scenario are compared to the cost of a conventional rehabilitation of the sewer network.

It has been proven that sustainable urban drainage techniques have come to stay as another option that the professional in charge of the urban drainage has to consider. Contrary to what certain analysts defended, sustainable urban drainage techniques are able to play a determinant role facing torrential rain events. However, the most convenient type of intervention will change depending on if total results or better profits on the investment are the priority.

---

**Key words:** Sustainable urban drainage, LID, SUDS, inundation, runoff, bio-retention, permeable pavement, green roof, integrated water management

---

## Agradecimientos

Desearía mostrar mi sincero agradecimiento a Manuel Gómez, tutor de este proyecto. Gracias por su tiempo, apoyo y guía durante el transcurso de estos últimos meses. Sin su colaboración este trabajo no habría sido posible.

También me gustaría expresar mi gratitud a todas las personas que me han acompañado a lo largo de estos seis años de estudios, que llegan a su fin con este proyecto. A mi familia por su apoyo incansable, a compañeros y amigos por hacer de esta etapa algo inolvidable y a los profesores por su labor en esta Escuela.



## Tabla de contenido

1.	Introducción .....	1
1.1.	Presentación .....	1
1.2.	Objetivos .....	2
1.3.	Estructura del documento.....	2
2.	La problemática del drenaje de aguas pluviales en áreas urbanas de la costa mediterránea española.....	3
2.1.	Las precipitaciones torrenciales del Mediterráneo occidental.....	3
2.1.1.	Principales características de las precipitaciones .....	4
2.1.2.	Causas de los grandes eventos torrenciales y su posible predicción .....	7
2.1.3.	Previsión de evolución de la pluviometría con el cambio climático .....	10
2.2.	La incidencia de la urbanización en el ciclo del agua .....	11
2.3.	Las inundaciones de las áreas densamente urbanizadas.....	14
2.4.	La contaminación de las aguas receptoras como consecuencia de las inundaciones ..	16
3.	El drenaje urbano sostenible como medida de actuación.....	20
3.1.	Redes de drenaje urbano convencionales y sus limitaciones .....	20
3.2.	Introducción al drenaje urbano sostenible.....	24
3.2.1.	Terminología .....	24
3.2.2.	Principios generales.....	27
3.3.	Beneficios de las técnicas LID .....	30
3.3.1.	Cantidad de agua .....	30
3.3.2.	Calidad del agua .....	32
3.3.3.	Biodiversidad .....	34
3.3.4.	Calidad de vida.....	34
3.4.	Inconvenientes de las técnicas LID .....	36
3.5.	Tipología .....	38
3.5.1.	Medidas no estructurales .....	38
3.5.2.	Medidas estructurales.....	40
3.6.	Implantación alrededor del mundo y en España .....	56
3.6.1.	Aplicación alrededor del mundo .....	56
3.6.2.	Aplicación en España .....	58
3.6.3.	Conclusiones .....	64
4.	Presentación del caso de estudio .....	65
4.1.	Motivación y objetivos .....	65
4.2.	Descripción y características de la zona: Cuenca urbana en el centro de Granollers..	68

4.3.	Hidrología .....	70
4.3.1.	Pluviometría .....	70
4.3.2.	Proceso lluvia-escorrentía .....	72
4.3.3.	Sub-cuencas.....	76
4.4.	Descripción de la red de drenaje actual.....	77
5.	Modelado del caso de estudio en SWMM5.....	79
5.1.	Descripción del software de cálculo.....	79
5.2.	Métodos de modelización y cálculo .....	81
5.2.1.	Proceso lluvia – escorrentía.....	81
5.2.2.	Cálculo hidráulico en la red de colectores.....	83
5.2.3.	Cálculo de la calidad del agua.....	86
5.3.	Simulación de las técnicas LID con SWMM5 .....	88
5.3.1.	Tipología .....	89
5.3.2.	Características de las capas y sus parámetros.....	95
5.3.3.	Aplicación de las técnicas LID en las sub-cuencas .....	101
6.	Cálculo y resultados del caso de estudio .....	103
6.1.	Escenario 0 .....	103
6.1.1.	Resultados .....	103
6.2.	Escenario 1 .....	106
6.2.1.	Selección y ubicación de las técnicas LID .....	106
6.2.2.	Implementación en el modelo .....	107
6.2.3.	Resultados .....	110
6.3.	Escenario 2 .....	112
6.3.1.	Selección y ubicación de las técnicas LID .....	112
6.3.2.	Implementación en el modelo .....	113
6.3.3.	Resultados .....	115
6.4.	Escenario 3 .....	118
6.4.1.	Selección y ubicación de las técnicas LID .....	118
6.4.2.	Implementación en el modelo .....	118
6.4.3.	Resultados .....	120
6.5.	Escenario 4 .....	122
6.5.1.	Selección y ubicación de las técnicas LID .....	122
6.5.2.	Implementación en el modelo .....	124
6.5.3.	Resultados .....	126
6.6.	Comparativa de resultados entre los diferentes escenarios .....	128
6.6.1.	Resultados en relación a la cantidad de agua .....	129

6.6.2.	Resultados en relación a la calidad del agua .....	138
7.	Comparativa económica .....	145
7.1.	Rehabilitación convencional .....	145
7.2.	Precios y mediciones para la valoración económica .....	150
7.3.	Presupuestos para cada uno de los escenarios de rehabilitación .....	151
7.3.1.	Presupuesto para el Escenario 1 de actuación con técnicas LID .....	151
7.3.2.	Presupuesto para el Escenario 2 de actuación con técnicas LID .....	152
7.3.3.	Presupuesto para el Escenario 3 de actuación con técnicas LID .....	153
7.3.4.	Presupuesto para el Escenario 4 de actuación con técnicas LID .....	154
7.3.5.	Presupuesto para el escenario de rehabilitación convencional .....	155
7.4.	Comparación y discusión de resultados .....	156
8.	Conclusiones .....	160
	Referencias bibliográficas .....	162

ANEXO 1: Cálculo de la lluvia de diseño

ANEXO 2: Parámetros de las sub-cuencas y los elementos de la red

ANEXO 3: Análisis de sensibilidad al completo

ANEXO 4: Mapa de antigüedad de las edificaciones de Granollers

ANEXO 5: Justificación de precios

## 1. Introducción

### 1.1. Presentación

Este trabajo se puede enmarcar en el ámbito de la hidrología urbana, y más concretamente en el drenaje pluvial urbano. Este campo de estudio se ha centrado históricamente en procurar una rápida evacuación de la escorrentía urbana mediante una red de alcantarillado a base de colectores enterrados. A lo largo de los siglos XIX y XX, los avances en el sistema de drenaje urbano fueron importantes, pero desde una perspectiva higienista. El drenaje urbano contribuyó a la reducción e incluso a la eliminación de epidemias de cólera que periódicamente asolaban las grandes ciudades europeas. En esa primera fase, las ciudades se reafirmaron en la apuesta por una red artificial y enterrada de recolección de aguas residuales y de la escorrentía pluvial. Sin embargo, durante las últimas décadas del siglo XX aparecen tendencias de modernización y técnicas novedosas que reactivan la innovación en la materia. Técnicas como los depósitos de retención o las balsas de laminación son una muestra del interés por la búsqueda de nuevas vías de actuación. El cambio de paradigma en el drenaje urbano viene marcado por la filosofía de reducir la escorrentía en vez de recolectarla, por medio del impulso de los procesos de retención e infiltración del agua de lluvia en terreno natural, y culmina en la aparición de las técnicas de drenaje urbano sostenible. Estas abogan por recuperar el comportamiento de la cuenca previo a su urbanización y resguardar el ciclo natural del agua. Se entiende que imitando el drenaje natural de la cuenca se maximizan las oportunidades y beneficios de la gestión del agua superficial en las ciudades.

El enfoque principal de este trabajo será el estudio de los beneficios e inconvenientes de este cambio de paradigma en el drenaje urbano en localidades del litoral mediterráneo de la Península Ibérica. Se pretende descubrir en qué medida son las nuevas técnicas de drenaje urbano sostenible una alternativa real para reducir los problemas de inundaciones que acechan estas áreas cada año. Se pretende realizar un estudio de aplicación de técnicas de drenaje urbano sostenible en una cuenca urbana real del litoral mediterráneo para evaluar los efectos de la incorporación de estos sistemas novedosos a una red de drenaje convencional.

Existe cierto escepticismo acerca de la viabilidad de esta alternativa y los datos reales de que se disponen son aún escasos para sacar conclusiones fiables. Aun así, existen iniciativas que defienden que las trabas a un drenaje más sostenible de nuestras ciudades provienen únicamente de la falta de impulso y promoción de las nuevas tendencias.

La gran mayoría de estudios hasta la fecha alaban los beneficios de una técnica en particular, basándose en los resultados de captación en origen que se han recopilado, con consideraciones de tipo cualitativo sobre la bondad de estas nuevas técnicas. En cambio, es poco común el estudio de qué cantidad de superficie física, esfuerzo institucional e inversión económica es necesaria a escala de ciudad para que el beneficio sea notable. No está comprobado aún que el balance final sea positivo, es decir, que su coste se vea compensado por el valor añadido que proporcionan estas técnicas. Con este trabajo se pretende aportar datos de simulación que arrojen algo de luz a esta cuestión; se estudiará en qué medida un drenaje urbano sostenible es capaz de rehabilitar un sistema de drenaje urbano y se discutirá si este método es técnica y

económicamente viable, en comparación con una rehabilitación de tipo convencional, mediante nuevas conducciones de mayor sección.

## 1.2. Objetivos

En resumen, con este trabajo se pretenden conseguir los siguientes objetivos:

- Conocer en más profundidad los problemas de inundación en el litoral mediterráneo; características y origen de las lluvias torrenciales, efectos de la urbanización de una cuenca natural y daños ocasionados en infraestructuras y ciudadanos.
- Profundizar en el conocimiento de las técnicas de drenaje urbano sostenible. Estudio de las tipologías existentes y los procesos por los cuales éstas son capaces de reducir el volumen total de escorrentía urbana.
- Aprender a diseñar un sistema de drenaje urbano compuesto, que comprenda tanto una red de alcantarillado convencional como elementos de drenaje sostenible. Incluye el estudio de la capacidad de las nuevas técnicas para solventar los problemas de capacidad de los colectores existentes.
- Desarrollar las herramientas de cálculo necesarias para el diagnóstico de un sistema de drenaje tradicional o sostenible: Hojas de cálculo y software de cálculo hidráulico SWMM5.
- Incorporar la evaluación de los contaminantes en los sistemas de drenaje urbano. Estudiar los procesos de acumulación y lavado de contaminantes existentes en los ambientes urbanos y cómo las técnicas de drenaje urbano sostenible son capaces de reducir la carga contaminante vertida al medio receptor.
- Analizar las ventajas y desventajas de la incorporación de técnicas de drenaje urbano sostenible en una cuenca urbana real del litoral mediterráneo español. Estudio de la reducción del volumen total de inundación, de la carga contaminante vertida al medio y realizar una comparativa económica con una rehabilitación convencional de la red.

## 1.3. Estructura del documento

El trabajo se estructura principalmente en dos partes diferenciadas: En la primera se expone de manera teórica el origen y características del problema de inundaciones que sufre el litoral mediterráneo y que beneficios e inconvenientes vienen asociados con una actuación mediante técnicas de drenaje urbano sostenible. La segunda parte del documento se centra en el comentario detallado del caso práctico de estudio en el que se analiza un caso real; se presenta la zona de estudio y la motivación del caso, se justifica el uso del software SWMM5, se comentan los resultados obtenidos y se lleva a cabo una comparativa económica entre los diferentes escenarios de actuación planteados y una rehabilitación de tipo convencional.

## 2. La problemática del drenaje de aguas pluviales en áreas urbanas de la costa mediterránea española

Una de las problemáticas específicas de las redes de drenaje urbano en gran parte del territorio español, y especialmente en la fachada mediterránea nororiental de la Península Ibérica, es la falta de capacidad de los colectores que las componen ante eventos de lluvia importantes. Las infraestructuras de alcantarillado de que disponen los núcleos urbanos están, en numerosos casos infra-dimensionadas; ya sea bien por haber sido diseñadas para un periodo de retorno insuficiente- o por haber quedado obsoletas ante la expansión urbanística en la cuenca de aporte y el aumento de escorrentía asociado. Estos eventos de fallo de la red de drenaje urbano son especialmente abundantes y acentuados en cuencas hidrográficas que combinan áreas urbanizadas con un elevado grado de impermeabilidad y eventos de lluvia de muy alta intensidad en cortos periodos de tiempo. Esta insuficiencia de capacidad de los sistemas de recolección de aguas pluviales plantea un escenario de inundación de calles y zonas comunes que conlleva daños materiales, personales y medioambientales. La consecuencia directa del fallo en las redes de drenaje es una excesiva escorrentía superficial en calzadas y aceras, con calados y velocidades que pueden suponer un riesgo al transeúnte, y el transporte directo de los contaminantes propios de áreas urbanizadas a las aguas receptoras. Por todos estos motivos, la incapacidad de los sistemas de recolección de aguas pluviales de proveer el servicio para el que fueron implementados es un problema que debe ser paliado.

Esta sección se va a centrar en presentar cuál es el origen de la problemática que se presenta en la mayoría de redes de drenaje urbano del mediterráneo español. Existen dos principales factores que atentan ante el correcto funcionamiento de los sistemas de alcantarillado: la particularmente impermeable tipología urbana que abunda en el territorio español y los eventos torrenciales de lluvia que conforman la mayor parte del volumen anual de precipitación en la fachada mediterránea de la Península Ibérica. Por lo tanto, podemos afirmar que los sistemas de drenaje de nuestras ciudades y pueblos necesitan que se les preste una especial atención, y para atender el problema debemos conocer bien sus fuentes.

### 2.1. Las precipitaciones torrenciales del Mediterráneo occidental

“La memoria histórica de las gentes de las regiones mediterráneas españolas está repleta de recuerdos de lluvias torrenciales y grandes inundaciones ocurridas sobre todo en el período otoñal del año. Estos permanecen muy presentes en las mentes e incluso en el modo de vida de las gentes de estas tierras que han mantenido durante siglos una batalla continua con unos ríos y torrentes que al tiempo que vivifican espléndidamente sus tierras, han sembrado cíclicamente sus vidas de desgracias. Si bien es cierto que siempre se ha trabajado en mejorar las infraestructuras de estas zonas de modo que soporten mejor los tremendos aguaceros, la verdad es que cuando estos se producen es difícil evitar completamente los terribles efectos de los mismos. Se hace, por tanto, necesario planificar y conseguir una adecuada prevención de este tipo de catástrofes” (Rivera, 1990). Esta cita presenta la relación del Mediterráneo español con las lluvias torrenciales y deja constancia de la necesidad de infraestructuras capaces de gestionar los efectos de eventos de este tipo. Debemos encontrar la manera de dotar a las infraestructuras

y sistemas de gestión del agua de nuestras ciudades y campos de la suficiente versatilidad como para ser eficientes ante los tipos de precipitación con la que estos que van a tener que lidiar. Para ello es imprescindible conocer bien la climatología y pluviometría de nuestra zona.

Vamos a centrarnos en primer lugar en analizar los procesos por los cuales se suceden los eventos de lluvia tan singulares de la fachada mediterránea española, qué es aquello que tanto les caracteriza y en qué medida afecta ello al estudio que se pretende llevar a cabo en este trabajo.

### 2.1.1. Principales características de las precipitaciones

Es comúnmente aceptado que el clima propio de la costa mediterránea occidental se corresponde con el tipo Csa de la clasificación climática de Köppen. La nomenclatura “C” se asocia a los climas templados en general (temperatura en el mes más frío menor a 18°C y superior a -3°C y la del mes más cálido superior a 10°C) y la “s” al tipo de régimen de lluvias que predomina (verano seco y cálido y lluvias estacionales). A esta tipología climática se le da la denominación de mediterráneo, por lo que debe su nombre a que se encuentra únicamente en zonas costeras del Mar Mediterráneo. La “a” únicamente lo diferencia del clima oceánico mediterráneo. D. J.M<sup>a</sup> Jansà (1969) afirma, en su *Curso de Climatología*, que el tipo C es el tipo de la variedad y que esta diversidad se manifiesta sobre todo en el régimen pluviométrico. Aunque la de Köppen parece una clasificación de nuestro clima bastante acotada, el clima mediterráneo es uno de los más complejos de interpretar y gestionar, y eso es debido a que estas lluvias estacionales presentan una elevada variabilidad mensual interanual. Aparece un gran contraste de precipitaciones y sequedad de unos años a otros, aun refiriéndonos a un mismo mes, y esta disparidad se acentúa a medida que nos acercamos al mar. Se resumen a continuación las principales características de los eventos de lluvia extrema que sufre el litoral mediterráneo, en base a los estudios sobre la materia de Martín Vide (1995) y Vide & Llasat (2000):

#### Variabilidad espacial y temporal

Según lo acabado de ver, podríamos citar como primera y más reconocida característica de la pluviometría costera mediterránea su gran variabilidad espacial y temporal. Esta es tal que “se llegan a dar anomalías pluviométricas de distinto signo entre diferentes áreas, esto es, que algunas comarcas presentan desviaciones positivas con respecto a promedios, mientras que otras quedan claramente por debajo de ellos” (Martín Vide, 1995). No es raro que en una cierta localidad, un año sea el otoño la estación más lluviosa y al siguiente la más seca. En Cataluña concretamente, el coeficiente de variación anual presenta valores superiores al 20% en casi todo su territorio; incluso pueden llegar a alcanzar el 40%. Podemos observar los datos en la figura a continuación.

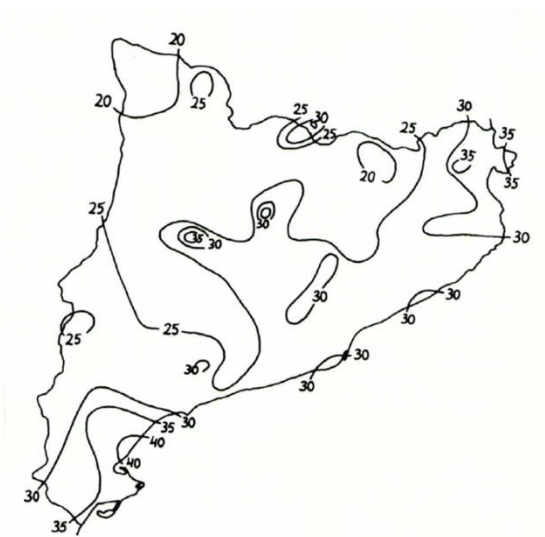


Figura 1: Coeficiente de variación anual de precipitaciones totales en Cataluña. Fuente: (Martín Vide, 1995).

No solo en términos totales se presenta la disparidad interanual, sino que incluso el orden cronológico de aparición de los grandes eventos difiere de un año a otro.

#### Irregularidad diaria y contribución al total anual

Por si fuera poca la variabilidad de la precipitación en la costa mediterránea occidental, llama además la atención la gran irregularidad diaria. Los eventos lluviosos de unos pocos días al año constituyen gran parte del total de precipitaciones anual. Esto hace que la concepción de seco o lluvioso que tenemos de un año, puede cambiar radicalmente por el hecho de que, en ese año, se den o no estos eventos tan por encima de la media, lo que sirve para entender la disparidad interanual temporal y zonal del punto anterior. Martín Vide (1995) aporta el dato de que, en Barcelona, sólo el 25% de los días más lluviosos aporta más del 70% de la precipitación anual y Russo y otros (2011), que alrededor del 50% de la precipitación acumulada anual se reparte en 2-3 episodios extremos. En zonas de la Comunidad Valenciana, Murcia o Andalucía oriental los porcentajes son aún mayores. Como dato singular, se tienen los más de 400 mm registrados en Alforja (Tarragona) el 10 de Octubre de 1994 que constituyeron dos tercios de la lluvia media anual en la población.

#### Marcada estacionalidad

A pesar de la incertidumbre a la hora de prever este tipo de eventos en el espacio y en el tiempo, el otoño sigue siendo la estación que concentra gran parte de las precipitaciones torrenciales anuales; aproximadamente un 75%.

#### Abundancia de casos



Aunque a priori parezca obvio, no debemos dejar de mencionar como una de las grandes características de las precipitaciones torrenciales en nuestro Mediterráneo la abundancia de casos. A medida que pasan los años, únicamente los eventos cuyo recuerdo permanece son aquellos más graves, posiblemente por ocasionar daños (materiales y personales) desproporcionados o por la existencia de algún otro elemento de interés mediático que interviniera en el suceso. Esto nos hace olvidar lo a menudo que suceden lluvias torrenciales de intensidad no desdeñable con efectos nocivos sobre las redes de alcantarillado y calles. Rara vez un evento por encima de los 100 mm/día un episodio de lluvia pasa sin ocasionar problemas de drenaje o inundaciones.

#### Escasa duración, persistencia y alta intensidad

Otra de sus características más significativas es la baja persistencia y alta intensidad de cada uno de estos eventos; la probabilidad de que un día lluvioso venga seguido de otro es muy baja comparada con la de otras zonas de la Península Ibérica. Más extraño resulta aún que se den dos días consecutivos de lluvias con intensidades destacadas. Esto se debe a que las lluvias torrenciales del Mediterráneo occidental son habitualmente de naturaleza convectiva, cuya fase de madurez es normalmente menor a 30 minutos. Por lo tanto, ese tipo de precipitación suave y continua tan característica en la Europa atlántica no es muy frecuente en el clima mediterráneo. Las mismas cantidades que en nuestro clima caen en horas o minutos en climas atlánticos tardan varios días en acumularse. En gran parte del territorio de Cataluña se supera el umbral de los 100 mm/día para un periodo de retorno de tan solo 10 años, dándose casos puntuales que alcanzan los 400 mm en 24 horas. Las intensidades horarias son aún más llamativas, registrándose en Barcelona aproximadamente 10 chubascos al año por encima de 1 mm/min, llegando alguno de ellos hasta los 5 mm/min.

#### Binomio sequía – precipitación torrencial

Como ya se viene elaborando en esta sección del documento, el clima mediterráneo es un clima de extremos, dentro de la moderación de un clima templado. No es poco habitual que después de una época de lluvias intensas prosiga un periodo de sequía muy acentuada, que se puede prolongar más de un mes. Esta es una característica difícilmente demostrable meteorológicamente pero sí empíricamente. Por otro lado, esto no significa que precipitaciones torrenciales vayan a paliar el déficit hídrico originado por la sequía. Esto se debe a que, al ser cortas e intensas la mayor parte se convierte en escorrentía y la infiltración es mínima, lo que las hace al mismo tiempo más peligrosas. El incremento de los consumos de agua ha hecho que la sequía se convierta en un tema de actualidad recurrente en el mediterráneo español. Aun así, en comparación con el resto de la Península Ibérica, la aridez en el Mediterráneo es moderada y no tiene un efecto notable en el paisaje, si bien aumenta a medida que nos desplazamos hacia el sur.

#### Consecuencias devastadoras

En el medio mediterráneo, la preocupación por el comportamiento de las precipitaciones en el mundo agrario se remonta a tiempos ancestrales. Las sequías e inundaciones son los rasgos más

característicos y, al mismo tiempo, los mayores problemas para el clima mediterráneo, como se menciona en el punto anterior. En las últimas décadas, la escasez y exceso de agua han supuesto grandes riesgos, no solo en el mundo agrario sino también en el ambiente urbano. El exceso de agua es, de los dos, el más difícil de combatir por su imprevisibilidad y capacidad destructiva. Los eventos de lluvia torrencial más intensos pueden ocasionar, en el ámbito rural, inundaciones repentinas y avenidas devastadoras de los ríos y torrentes, así como una tremenda erosión de los suelos. En áreas urbanizadas pueden inundar calzadas y aceras con calados de más de un metro, viviendas y ocasionar múltiples daños tanto materiales como personales. Es por ello que debemos conocer bien los procesos por los que se rige para poder predecirlos y protegernos ante sus brutales efectos.

### Dificultad de previsión

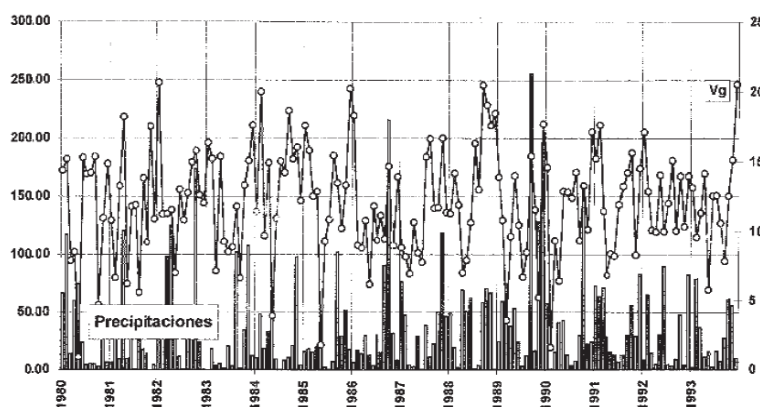
Como se verá a continuación, los procesos por los cuales se rigen los eventos de lluvia torrencial en el Mediterráneo español no son para nada fáciles de definir, y por ello resulta una tarea compleja anticiparlos. Los profesionales de la predicción meteorológica coinciden que predecir el tiempo en latitudes españolas es una tarea más difícil que en otras latitudes. Se puede concluir que el mapa pluviométrico de la costa mediterránea ibérica es muy complejo; incluso a escalas pequeñas éste resulta un rompecabezas de núcleos de isoyetas, plagado además de excepciones. Por lo tanto, al no ser el comportamiento de las precipitaciones torrenciales en nuestras costas regular, ni siguen ningún patrón claro, éstas no son fácilmente previsibles. Este tipo de fenómenos está todavía mal resuelto por las técnicas modernas de predicción y se necesita aún una larga investigación en la materia.

### **2.1.2. Causas de los grandes eventos torrenciales y su posible predicción**

Es generalmente aceptado que las lluvias de tipo torrencial se cataloguen como lluvias de convección, en las que masas de aire caliente ascienden rápidamente por su baja densidad después del calentamiento local por la radiación solar. En este ascenso de las masas de aire caliente se forman nubes de desarrollo vertical (cúmulos y cumulonimbos), dando lugar a precipitaciones si se superan ciertos valores de presión y temperatura. Pero lo que no queda tan claro es si, a mayor escala, hay algún proceso atmosférico que sea el motor de los grandes eventos torrenciales en el Mediterráneo occidental. Nos interesa conocer si existen indicadores que nos puedan ayudar a predecir estos eventos, dada su variabilidad espacial y temporal. Esta materia ha sido extensamente tratada por Quereda & Montón (1996) y Quereda y otros (1999):

Las grandes situaciones ciclogénicas del Mediterráneo occidental vienen estrechamente relacionadas con la bifurcación de los Oestes, de la Circulación General Atmosférica, frente a las costas del continente Europeo. Se produce en dichas circunstancias una divergencia de isobaras e isotermas, lo que coloca sobre la península Ibérica importantes áreas de bajas presiones. Estos eventos se entienden como anomalías en la Circulación Atmosférica General, con las que están estrechamente relacionadas las situaciones depresionarias que ocasionan los eventos torrenciales en las zonas costeras mediterráneas de la Península Ibérica.

El mediterráneo occidental es una zona de transición entre el continente europeo con vertiente atlántica y el norte de África, y es su localización geográfica la que le hace ser una zona de fuerte contraste térmico entre el aire polar y el tropical. Es este contraste el que constituye el motor de la Circulación General Atmosférica que es la determinante en el flujo atlántico proveniente del Oeste, que a su vez contribuye a mantener estas mismas diferencias de temperatura. La persistencia de esta situación de aparente estabilidad implica intercambios Norte-Sur de energía, que se van intercalando con ondas bien marcadas y de gran amplitud de los vientos del Oeste. Quereda & Montón (1996) afirman que esas mismas exigencias de difusión energética hemisférica en simultaneidad con las situaciones de anomalía en la Circulación General Atmosférica, se traducen en intercambios regionales de vapor. Comprueban también que todas las grandes ciclogénesis mediterráneas parecen ser procesos de reacción ante la persistencia de altos valores de circulación con vientos superiores a los 15 m/s de promedio mensual. La siguiente figura demuestra esta coincidencia (Vg responde por la velocidad del viento geostrófico):



**Figura 2: Correlación entre períodos de altos valores de circulación y los sucesos de precipitaciones intensas correspondientes al promedio mensual de los observatorios de Alicante, Valencia y Castellón. Fuente: (Quereda & Montón, 1996).**

Por lo tanto, aquellos factores causantes de los eventos de lluvias torrenciales en la cuenca occidental del Mediterráneo serán aquellos implicados en variaciones de la distribución hemisférica de la temperatura y el vapor; aquellos que alteren el balance energético de la atmósfera.

Todo apunta a que estos escenarios de inestabilidad y anomalía en la atmósfera tienen su origen en el efecto de la actividad solar sobre la Circulación General, junto con influencia de factores geográficos y orográficos. Se ha demostrado que existe una clara correlación entre los ciclos pluviométricos y los ciclos solares. De modo que centrando la atención en la influencia de la radiación solar sobre el balance energético hemisférico se pueden comprender mucho mejor los eventos de ciclogénesis en nuestras latitudes. Quereda y otros (1999) proponen que la relación entre la pluviometría y los ciclos solares se debe principalmente a dos procesos: las propias variaciones de radiación solar y la interacción atmósfera-mar.

La intensidad de radiación solar recibida en superficie puede verse alterada por variaciones en el albedo y la transparencia atmosférica. Eventos como las erupciones volcánicas sirven de claro ejemplo para mostrar como los mínimos pluviométricos coinciden con la presencia de sus aerosoles, que bloquean la radiación solar.

Se ha estudiado mucho sobre el papel indicador de la temperatura de la superficie del mar sobre el balance energético del hemisferio. Se demuestra que las grandes ciclogénesis mediterráneas se dan en momentos de mayor gradiente de temperatura entre el Atlántico Norte y el Mar Mediterráneo; gradientes anormales serían la base de las grandes anomalías en la Circulación General. Según Quereda & Montón (1996), estas alteraciones del balance energético se dan también en momentos de altos gradientes térmicos entre la temperatura superficial del mar y la temperatura del aire, en los que se pone de manifiesto la importancia del factor geográfico regional. Cuando estos gradientes alcanzan valores notables, entre el mar cálido y las masas de aire más frías sobre esta, se calienta rápidamente el aire en contacto con la superficie del mar y se desencadena el proceso por el cual se originan las ciclogénesis convectivas. “Así sucede en los procesos ciclogénéticos de fin de verano y de otoño, cuando la inercia térmica del mar mantiene todavía sus temperaturas elevadas y las masas de aire polar comienzan sus primeras irrupciones hacia las latitudes meridionales” (Quereda, Montón, & Escrig, 1999)

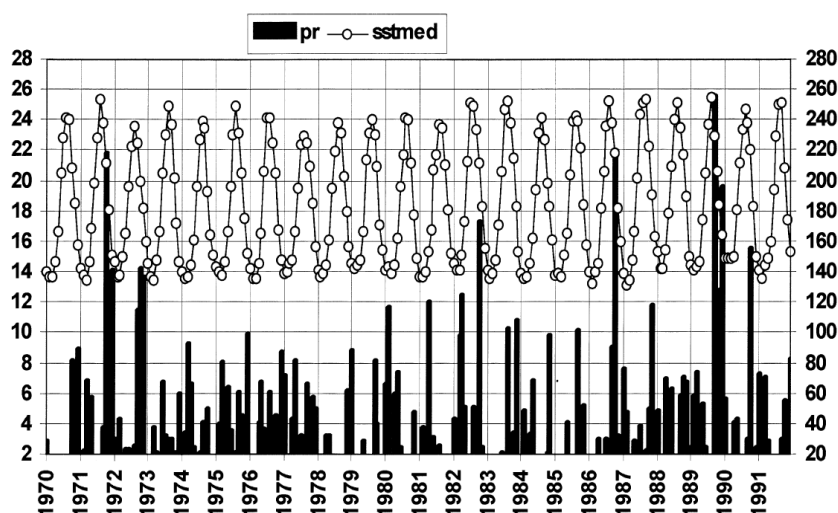


Figura 3: Relación entre las grandes ciclogénesis mediterráneas y las anomalías positivas de la temperatura de la superficie del mar. Fuente: (Quereda, Montón, & Escrig, 1999).

Por lo tanto, se puede concluir que “Las grandes ciclogénesis mediterráneas parecen sobrevenir como respuesta a persistentes anomalías energéticas hemisféricas. Estas quedan reflejadas en la temperatura superficial de los océanos. En consecuencia, la exageración de gradientes térmicos hemisféricos puede constituir un buen indicador para la previsión de tales sucesos atmosféricos. En este sentido, se sugiere que las anomalías positivas de temperatura mediterráneas a finales de otoño puedan constituir un factor clave en la actividad ciclónica torrencial de la región” (Quereda & Montón, 1996).

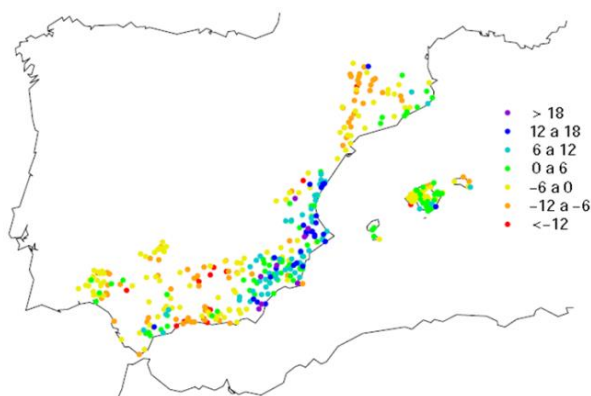
### 2.1.3. Previsión de evolución de la pluviometría con el cambio climático

Aceptamos comúnmente el cambio climático como la subida progresiva de las temperaturas en la atmósfera terrestre debido a la acumulación de gases de efecto invernadero, y es sin duda un enfoque general que pocos se atreven ya a rebatir. Pero resulta interesante recordar lo que confirma el IV Informe del IPCC (Panel Intergubernamental para el Cambio Climático), y es que el cambio climático se presentará en el futuro, no solo como un aumento de la temperatura media, sino como un incremento de la variabilidad en el ritmo de las temperaturas (Olcina, 2009). Es decir, que suba la temperatura media no significa que ya no vayan a darse temporales de frío intenso; estos serán menos frecuentes pero no menos contundentes.

En este punto insistiremos en el enfoque del cambio climático por efecto invernadero como alteración de las pautas climatológicas. Esto no significa que se obvie la gravedad del constante aumento de las temperaturas, sino que se pretende concienciar que los seres vivos pueden adaptarse a una moderada subida de temperaturas, pero quizás no a una aseveración de la peligrosidad de los fenómenos meteorológicos extremos. Y es precisamente uno de estos fenómenos meteorológicos susceptible de intensificarse notablemente del que nos interesa conocer el posible comportamiento futuro, las lluvias torrenciales.

Se ha registrado, en España, en las últimas décadas un descenso de la cobertura de hielo y nieve y de los días de nieve al año, un ascenso del nivel marino y un incremento térmico (0,4°C por década en invierno y 0,6°C en verano). Pero en lo que respecta a las precipitaciones existen muchas incertidumbres. Olcina (2009) destaca que éste es el parámetro que menos significación estadística ha mostrado en la última centuria, y eso que la percepción ciudadana habla de disminución de las lluvias en las últimas décadas. Sin embargo, no hay consenso en los modelos de predicción. Lo único que se puede confirmar es un señalado aumento en la irregularidad en las precipitaciones, característica que ya conocíamos y se ha ido comentando en esta sección del trabajo. Las lluvias torrenciales son cada vez más copiosas y los periodos de sequía cada vez más devastadores. “Durante los últimos treinta años, los episodios de sequía y escasez, por un lado, y de inundación, por otro, han aumentado en la Unión Europea de forma importante en frecuencia e intensidad, mostrando las últimas tendencias un crecimiento significativo de los impactos de inundación en toda Europa” (Lara & Prieto, 2014).

Los diferentes estudios sobre la evolución de las precipitaciones en la cuenca occidental del Mediterráneo (Quereda, Montón, & Escrig, 1999), (Gujarro, 2002), (López-Bustins, Sánchez-Lorenzo, Molina-Azorín, & Ordoñez-López, 2008), etc.) no son capaces de divisar tendencias claras. La variabilidad espacial y temporal tan comentada de las precipitaciones torrenciales en el litoral mediterráneo tiene gran influencia sobre el cálculo de las tendencias, lo que lleva a obtener resultados incongruentes y poco esclarecedores. Se resalta de nuevo la tremenda influencia de los factores geográficos y orográficos, esta vez para remarcar ligeras tendencias evolutivas de mismo signo en las precipitaciones, en zonas de características geográficas similares. Por otro lado, según Velasco y otros (2015), las intensidades de precipitación extremas en medio urbano podrían incrementarse entre el 10% y el 60%, debido a los impactos del cambio climático. Se presentan a continuación las tendencias que, por ejemplo, Gujarro (2002) calcula en la pluviometría del Mediterráneo español; estas ejemplifican la variabilidad mencionada y la dificultad de establecer un patrón definido.



**Figura 4:** Distribución espacial de las tendencias (% por década) de la precipitación en el área mediterránea española (1964 – 1993). Fuente: (Guijarro, 2002).

El futuro al que aboca el cambio climático a las comarcas mediterráneas españolas será probablemente una exageración del presente que estas viven hoy día en lo que respecta a la dicotomía precipitaciones torrenciales – periodos de sequía. Es un motivo extra para insistir en el estudio del comportamiento de este binomio y en esforzarse por gestionarlo de manera eficiente. Mailhot & Duchesne (2010) coinciden en esta conclusión y tratan sobre cómo este hecho debe plantearse a la hora de establecer los criterios de dimensionamiento para infraestructuras de drenaje urbano.

## 2.2. La incidencia de la urbanización en el ciclo del agua

Recordemos que la singular pluviometría del Mediterráneo occidental es solo uno de los componentes de la problemática que se está presentando en lo que refiere al drenaje del agua de escorrentía en medio urbano. La segunda parte de la ecuación hace referencia a la propia ciudad, o mejor dicho a la creación de una ciudad en un área en la que antes no la había.

Entendemos el ciclo hidrológico como el proceso por el cual el agua es capaz de circular o conservarse por las distintas partes de la hidrosfera, cambiando o no de estado, cíclicamente de manera que la cantidad total de agua en el planeta no cambia. “El equilibrio de la naturaleza descansa entonces sobre el desarrollo armonioso de estos ciclos” (Lepe, 2002). En el ciclo del agua intervienen múltiples procesos: evaporación, transpiración, condensación, precipitación, infiltración, escorrentía, circulación subterránea, etc. Por lo tanto, entendiendo la urbanización como la creación de una capa impermeabilizante sobre una cuenca en estado natural, se está interfiriendo en una gran parte de los procesos que componen el ciclo hidrológico. Es decir, se está causando una perturbación en la dinámica natural del medio ambiente, alterando los procesos que componen el ciclo del agua. Actuando directamente sobre evaporación, infiltración y escorrentía, se consigue alterar el ciclo del agua al completo; evapotranspiración a corto plazo e infiltración pueden hasta llegar a anularse en áreas densamente urbanizadas. Una cuenca urbana fue en algún momento una cuenca rural, con lo que el ser humano modifica la respuesta hidrológica de una cuenca frente a las precipitaciones; previamente a su intervención



existía una red de drenaje natural que desaparece para implantar colectores, encauzamientos, elementos de retención, etc.

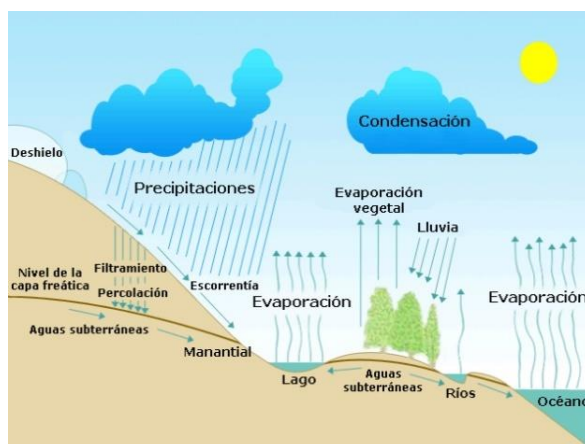


Figura 5: Esquema del ciclo hidrológico. Sus procesos se ven afectados por la urbanización de la cuenca.

El hecho de impermeabilizar una superficie natural por la utilización de materiales que no permiten la percolación a través de ellos anula automáticamente su capacidad de infiltración; la infiltración se reduce en favor de mayor escorrentía. La circulación subterránea se reduce en la misma medida que se pierde capacidad de infiltración. Del mismo modo en que la superficie impermeable de la cuenca no es capaz de permitir la percolación hacia el subsuelo, tampoco permite que el agua que se encuentra bajo esta capa se evapore, volviendo a la atmósfera.

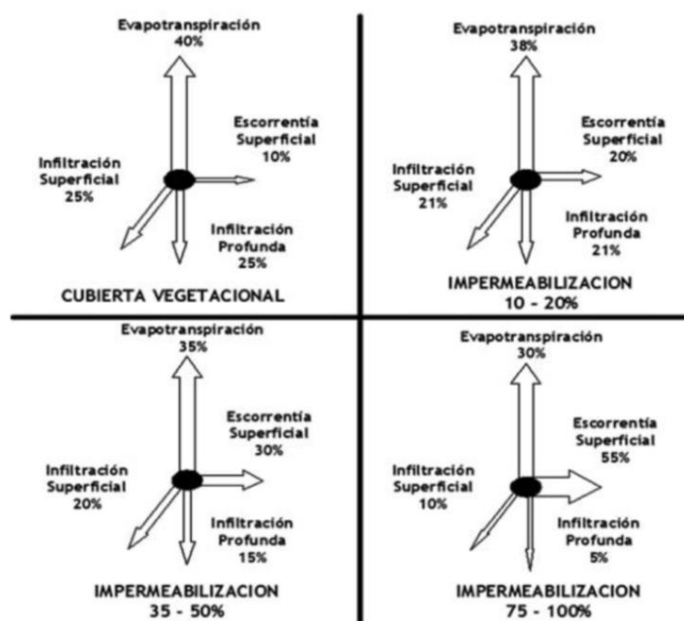


Figura 6: Alteración del ciclo del agua al impermeabilizarse una cuenca rural según el porcentaje que ocupa cada proceso hidrológico. Fuente: (Arnold & Gibbons, 1996).

Una cuenca no pasa a ser de rural a urbana de manera instantánea, se trata de un proceso progresivo. A medida que se va urbanizando, la percolación de las aguas de lluvia caídas va disminuyendo y gana importancia la escorrentía superficial. Esto se suma a que la pavimentación y nivelación de superficies reducen de manera notable la resistencia al flujo de estas de manera que va aumentando la velocidad de escurrimiento. Se reduce de manera importante el tiempo de concentración, lo que contribuye a un incremento del caudal máximo y el volumen de escorrentía; se modifica el hidrograma aguas abajo, es más brusco (se reduce el tiempo entre el inicio de la lluvia y la punta de caudal). Tal es el efecto de la transformación de una cuenca rural a urbana que en distintas cuencas experimentales el incremento de caudal pico se puede superar entre 8 y 10 veces y el volumen de escorrentía de 3 a 8 veces. Además, los movimientos de tierras necesarios para conseguir superficies adecuadas para la implantación de los diferentes elementos urbanos conducen a que la erosión y arrastre de sedimentos de estas áreas durante temporales de lluvia incidan sobre la morfología de los cauces aguas abajo (García, Álvarez, & Sánchez, 2006). Con la intención de solucionar los problemas generados, se realizan costosas intervenciones de encauzamiento y protección contra inundación de zonas urbanas situadas aguas abajo, que en su mayoría continúan la cadena de destrucción del hábitat natural, y que quedarán pronto obsoletas si el proceso urbanizador sigue el patrón actual (Perales & Andrés-Doménech, 2007).

De acuerdo con Riccardi (1997), numerosos estudios confirman que el clima de una cuenca se altera en la medida que se urbaniza. Las precipitaciones podrían llegar a aumentar entre el 5 y el 15 % debido a un aumento de temperatura de los ambientes urbanos, entre 0,5 y 3°C, y a cambios en los vientos dominantes. Estos datos serían en cierto modo una reinterpretación a escala local de los procesos comentados en el punto anterior.

La urbanización tiene sus efectos también sobre el balance del agua a nivel de cuenca. Los habitantes de una ciudad necesitan ser provistos de agua potable, y estos recursos provienen en ocasiones de los acuíferos locales. Las actividades diarias como riegos y limpieza de calles pueden alterar las condiciones de humedad del suelo, lo que sumado a los efectos de la impermeabilización de la cuenca ya mencionados, desemboca en cambios en los niveles de los acuíferos.

Aun así, la población continua creciendo (se esperan de 8 a 10 mil millones de habitantes en 2050), un 90% de este crecimiento en países desarrollados. Esto conllevará el crecimiento de las mega-ciudades de más de 10 millones de habitantes. Se espera que siga habiendo un desplazamiento de lo rural a lo urbano, hasta alcanzar en 2050 un 83% de la población viviendo en aglomeraciones urbanas, en Europa (Velasco, Cabello, & Russo, 2015). Las ciudades continúan creciendo cuenca arriba, generándose cada vez más escorrentía y generando nuevas demandas de ampliación del sistema de recolección. Es decir, lejos de respirarse un ambiente de concienciación ante la problemática, se espera que el impacto de las ciudades sobre el ciclo del agua sea cada vez mayor.

Vistos los efectos de la impermeabilización de cuencas resulta fácilmente deducible que, los efectos serán más visibles o menos en función de la historia, patrones y densidades del desarrollo urbanístico; cuanto mayor sea el área natural cubierta por edificios, aceras, calzadas, etc. más notorias serán las consecuencias. Es por este motivo que los problemas relativos a un drenaje pluvial urbano deficiente se encuentran en cascos urbanos antiguos en los que



predominan calles estrechas y pocos espacios verdes, muy habituales en la geografía española. Se descubre así la problemática a la que se enfrentan muchas de las ciudades de las regiones mediterráneas, donde los factores desencadenantes de las grandes inundaciones se dan de manera muy acusada. Las pequeñas cuencas urbanas del entorno del barcelonés son el claro ejemplo de lo que se pretende transmitir. Para un periodo de retorno de 10 años son normales caudales específicos de 15 a 25 m<sup>3</sup>/seg/km<sup>2</sup> y la cuenca de Bogatell, en concreto, desagua al mar 350 m<sup>3</sup>/s cuando la capacidad máxima de dicha sección era de 40 m<sup>3</sup>/s antes de la remodelación del drenaje de Barcelona. Se trata de cuencas urbanas pequeñas y con fuertes pendientes donde se ha dado un crecimiento urbano rápido y desordenado. Al mismo tiempo existen condiciones climáticas muy adversas, con las lluvias torrenciales como principal protagonista (Gómez, 2007).

### 2.3. Las inundaciones de las áreas densamente urbanizadas

Una vez comentados los dos factores principales causantes de la situación que se vive en las ciudades de la costa mediterránea española ante eventos extremos de inundación de las calles, es importante conocer también cuáles son sus efectos y cómo gestionarlos de manera eficiente.

Tal y como se ha comentado en el anterior punto, el exceso de escorrentía en las ciudades es fruto de la incontrolada urbanización en pequeñas y empinadas cuencas del litoral mediterráneo y de las lluvias torrenciales, habituales en la zona. Este hecho, unido a la insuficiente capacidad de las redes de drenaje urbano convencionales, es el causante de graves problemas de inundación. “Una urbanización mal ubicada origina la colmatación de cauces así como la instalación de drenajes artificiales que no tienen la dimensión necesaria para responder a caudales punta, lo que ocasiona en ocasiones especiales la invasión por las calles de riadas de fango, al mismo tiempo que se obstruyen las redes de saneamiento” (Arranz, 2008). Este fenómeno recibe también la denominación de “flash flood”; es decir, inundaciones rápidas e intermitentes producidas por el exceso de escorrentía superficial.

Cualquier red de alcantarillado es diseñada, en primera instancia, para recolectar las aguas de escorrentía provenientes de la lluvia (y aguas residuales, en función de si la red es unitaria o separativa) y, de esta manera, proveer al transeúnte, tráfico rodado, viviendas y en definitiva los elementos que conforman la ciudad como ente, de seguridad y calidad de vida. Por este motivo llama la atención la escasez, en gran cantidad de localidades, de criterios de riesgo establecidos que sirvan de guía para el diseño de las redes de drenaje pluvial en caso de fallo de esta. Más aún en las localidades del litoral mediterráneo (que se tratan en particular en este trabajo), en las que se conoce de antemano que los colectores de la red se verán desbordados con relativa frecuencia. Por otro lado, los daños provocados por inundaciones son infravalorados tanto por instituciones públicas como por la población. Esto llama especialmente la atención cuando las inundaciones son el riesgo natural que mayor número de víctimas ha causado (cerca de 40%) entre 1990 y 2005. Además, según un reciente informe de la Comisión Europea, las últimas 363 inundaciones importantes en Europa han generado unas pérdidas económicas de 150.000 millones de Euros (Velasco, Cabello, & Russo, 2015). Esta infravaloración se traduce en la minimización de medidas de prevención ante la presencia de un episodio de lluvias torrenciales, tal y como indica Arranz (2008). Parece lógico que se diseñe la infraestructura encargada de evitar los daños relacionados con eventos de inundación con la mirada puesta en los riesgos que

estos pueden ocasionar a la ciudad y sus habitantes. Se pone de manifiesto la importancia de la planificación y la gestión de las redes de alcantarillado como elemento esencial para mejorar la resiliencia de nuestras ciudades frente al problema de las inundaciones (Velasco, Cabello, & Russo, 2015).



Figura 7: Situación de la AvingudaParalel en Barcelona durante el episodio del 21/10/2009 (izquierda) y la situación en la Calle Sant Pau durante el episodio del 30/07/2011 (derecha). Fuente: (Velasco, Cabello, & Russo, 2015).

Se debe centrar la atención en el comportamiento hidráulico del sistema de calles ante eventos de precipitación extrema. Lo más habitual es encontrar criterios de seguridad en la calle a través de imposiciones sobre calado y velocidad de la escorrentía en las calles, para un determinado periodo de retorno. Por ejemplo, la ciudad de Barcelona limita el calado máximo a 0,06 m y la velocidad máxima a 1,5 m/s (Gómez & Russo, 2009). El criterio a aplicar sobre el calado será muy variable en función de las consideraciones que se hagan; se puede tomar como referencia la altura de los bordillos, las entradas a viviendas y negocios o el porcentaje de calzada cubierto de agua. Cada Administración Pública decidirá en función de los problemas más habituales en cada localidad. Se tiende a menospreciar la velocidad que puede alcanzar el flujo de agua en las calles; así como los calados que nos encontramos en zonas urbanizadas son relativamente bajos, las velocidades pueden alcanzar valores más que notables. No se debe olvidar que es la propia urbanización de la cuenca rural la que puede multiplicar por 10 el caudal pico y, en consecuencia, las velocidades. En lo referente a la velocidad máxima se suelen adoptar criterios basados en la observación y la experiencia; en general se procura que sean valores que permitan a un individuo vencer la resistencia al flujo de agua (Gómez & Russo, 2009).

Muchos autores proponen también criterios sobre la relación entre calado y velocidad, entendiendo que es la actuación conjunta de ambos la que pone en riesgo la seguridad en las calles. Los parámetros investigados serían el producto del calado y la velocidad y el producto entre calado y el cuadrado de la velocidad. Aplicar un criterio sobre el primero de ellos tendría el objetivo de limitar el momento que ejerce el flujo de agua sobre el peatón, que podría provocar el vuelco de éste (se suele limitar este parámetro a aproximadamente  $0,5 \text{ m}^2/\text{s}$ , asumiendo un peso de unos 50 Kg). Aplicar un criterio sobre el segundo estaría relacionado con minimizar la reducción de las fuerzas de fricción entre el peatón y la calzada, con el objetivo de evitar el deslizamiento (se comprueba que a partir de  $1 \text{ m}^3/\text{s}^2$  existe este problema). Aun así, en muchas ocasiones, si se cumplen los criterios sobre el calado y la velocidad independientes uno del otro se cumplen automáticamente los criterios conjuntos. Resulta muy visual representar los

cuatro criterios en una gráfica calado – velocidad para distinguir que combinación de factores produce una inundación peligrosa y cual no:

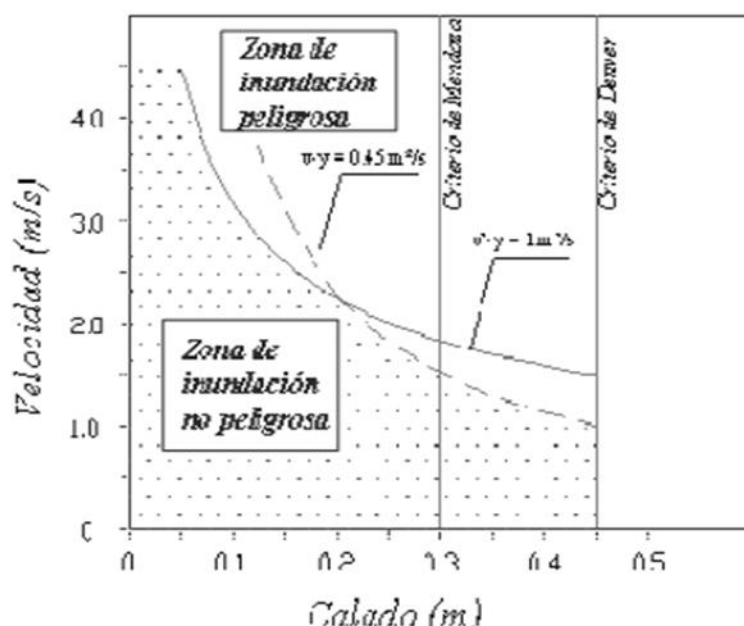


Figura 8: Criterios de riesgo para flujo en calles. Fuente: (Gómez & Russo, 2009).

Para pendientes empinadas, la velocidad máxima será el parámetro más restrictivo y para pendientes suaves lo será el calado máximo. Los criterios que se escojan irán muy ligados a la capacidad de los imbornales para transferir los caudales de escorrentía hacia la red de drenaje; cuanto más restrictivo sea el criterio, más imbornales se deberán colocar.

Para el caso concreto de las ciudades del litoral mediterráneo, incluso existiendo normativas que exigen el cumplimiento de los criterios que se han ido comentando en este apartado en la planificación urbanística, en la realidad las ciudades se siguen expandiendo de manera irresponsable; se ocupan cauces naturales que hacen la función de aliviaderos de procesos de inundación, no se proponen suficientes zonas verdes que favorezcan la infiltración, no se tiene una concepción de la ciudad como sistema drenante a dos niveles (superficial y subterráneo), se infra-dimensiona la red de drenaje artificial y un largo etcétera de malas praxis a la hora de urbanizar con conciencia de con qué tipo de pluviometría y cuencas se está tratando.

## 2.4. La contaminación de las aguas receptoras como consecuencia de las inundaciones

Como ya se ha ido comentando en los apartados anteriores, después de sufrir el proceso impermeabilizador que implica la urbanización de una cuenca natural, la escorrentía superficial acapara todo el protagonismo, especialmente en eventos de lluvia intensa en los que la red de drenaje artificial se colapsa y no es capaz de ejercer su función. A pesar de la eliminación de los

cauces naturales, la nueva cuenca urbana sigue drenando hacia los ríos, mares, lagos, etc. por medio de la red de colectores, y cuando un evento de inundación tiene lugar los cuerpos de agua receptores siguen siendo los mismos; únicamente cambia el instrumento de canalización de los caudales, que en este caso serán las calles o los colectores de la red. Luego, además de la problemática intrínseca a la inundación entendida como acumulación anormal de agua en las calles con importantes calados y velocidades, se introduce ahora una problemática adicional asociada a la calidad del agua que se vierte a las aguas receptoras. Esto es debido a que la misma escorrentía superficial que compone las aguas de inundación arrastra consigo una variedad notable de contaminantes que se encuentran en el ambiente urbano. Este tipo de inundación recibe el nombre de contaminación difusa; una fuente no puntual de contaminación hídrica que afecta a los cuerpos de agua por aporte de diferentes fuentes. Este hecho hace que este tipo de contaminación sea muy difícil de controlar.

Al inicio de cualquier evento de precipitación, tanto los habituales como los extremos, se da el proceso conocido como “firstflush” o primer lavado. Este consiste en que la gran parte de los contaminantes depositados y acumulados en las calles durante el periodo seco previo a la lluvia son arrastrados por los primeros caudales de escorrentía. Durante los primeros minutos de lluvia aún no se han generado grandes volúmenes de escorrentía, luego la concentración de contaminantes será elevada en el “firstflush”; este es la principal fuente de contaminación de la escorrentía superficial urbana. Es importante tener en cuenta, también, que los grandes aguaceros movilizan sólo una pequeña parte de la contaminación vertida anualmente en el medio receptor; ya que la mayoría de las lluvias acontecidas serán pequeñas, y cada uno de estos eventos arrastra prácticamente todo el contaminante que se encuentra en las calles.

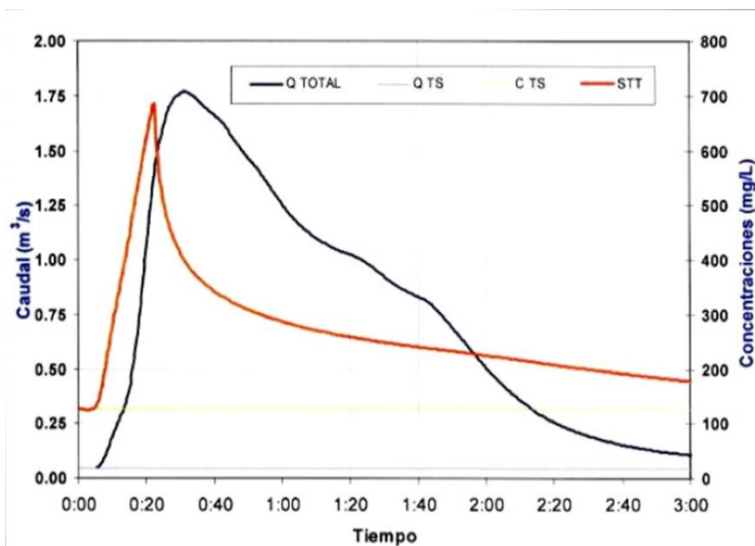


Figura 9: Ejemplo de desfase entre los picos de hidrograma y polutograma del caudal de escorrentía urbana. En este caso se monitoriza la concentración en mg/L de sólidos totales (STT). Fuente: (Piñeiro, Maestro, Suárez, Puertas, & Anta, 2008).

El problema se acentúa si, además, la red de drenaje es unitaria; los sedimentos que durante el tiempo seco se han ido depositando en la red como consecuencia del tránsito de las aguas residuales son lavados por las aguas pluviales (Perales & Andrés-Doménech, 2007).

Devolver estas aguas contaminadas al medio con la calidad que se requiere por normativa, obliga a su tratamiento en estaciones depuradoras. Además, éstas deberán ser capaces de gestionar los crecientes volúmenes de escorrentía que le llegan, lo que supone un notable sobre coste en infraestructura. La solicitud a nivel normativo y legal de los niveles de contaminantes en las aguas receptoras, principalmente por parte de la Directiva Marco del Agua (2000), dificulta en gran medida la depuración de estas aguas. Los contaminantes más frecuentes que se pueden encontrar en las aguas receptoras de escorrentía urbana son los siguientes:

- Sedimentos: El incremento de la velocidad del agua al fluir sobre una superficie impermeable puede causar erosión, luego en cualquier parte en la que el suelo se encuentre ligeramente suelto este puede acabar siendo arrastrado hasta los cursos de agua. Eventualmente, cuando el agua es descargada pierde velocidad, y es entonces cuando el sedimento se deposita en el fondo del respectivo arroyo, lago, estuario, etc. Este sedimento puede causar daños en fauna y flora del ambiente acuático reduciendo la visibilidad, la penetración de la luz, causando un impacto adverso en insectos acuáticos (base de la cadena alimenticia) y deteriorando los hábitats. En cantidades excesivas la deposición de sedimentos puede reducir el calado de cursos de agua navegables.
- Metales: Cadmio, cobre, cobalto, hierro, níquel, plomo y zinc se depositan en calzadas y aceras por los gases de escape de los vehículos, forros de freno y material de desgaste de neumáticos y motores. Cuando, tras un evento intenso de lluvia, la escorrentía superficial es importante esta los arrastra hasta el punto de descarga. Tejados de metal galvanizado, canaletas y bajantes también son fuente de zinc en el drenaje pluvial. El cobre utilizado en construcción puede ser arrastrado también. Y sobre todo las concentraciones de hierro, presente en nuestro entorno urbano en cientos de elementos (farolas, señales de tráfico, tapas de registro, etc.). Algunos metales pueden ser dañinos o incluso mortales para humanos y/o fauna acuática. Como el agua de lluvia es ligeramente más ácida, esta tiene mayor capacidad para disolver metales que el agua convencional.
- Nutrientes: Fosfatos y nitratos entran al agua de lluvias provenientes de fertilizantes, la descomposición de rocas y suelos naturales, la expulsión de gases de escape de los vehículos, detergentes y deposiciones de mascotas entre otros. Nitrógeno y fósforo reducen los niveles de oxígeno en el agua al incrementar el crecimiento de algas y plantas acuáticas, causando la muerte así de otros organismos acuáticos.
- Pesticidas: Incluso las tierras de cultivo tienen niveles de pesticida muy por debajo a los niveles urbanos; aproximadamente diez veces menores por metro cuadrado. No existe conocimiento ni control relativo al uso de pesticidas en ciudades, luego las cantidades de estos que llegan a los cuerpos de agua receptores se sigue incrementando.
- Microorganismos: Aunque la materia fecal seguiría existiendo aun sin el proceso de urbanización, esta estaría siendo filtrada por suelos y plantas. En cambio en la situación en la que vivimos, en ciudades densamente urbanizadas como las que estamos centrando la atención ésta es rápidamente transportada por el agua de lluvia. Además, las ciudades atraen aves y una gran parte de la población posee mascotas; fuentes de materia fecal en las calles. La materia fecal introduce E.Coli y coliformes fecales en



aguas que pueden tener un uso recreativo por parte de la población, lo que puede ser origen de enfermedades de piel.

- Hidrocarburos y subproductos de vehículos: Los líquidos refrigerantes y anticogelantes utilizados en la industria automovilística que contienen etilenglicol y propilenglicol pueden ser tóxicos. Aceite, grasa y otros hidrocarburos relacionados con el uso y mantenimiento de vehículos también contaminan la escorrentía urbana. Los materiales de escape de los vehículos que se deposita en los pavimentos y selladores con base de alquitrán utilizados en la pavimentación de firmes también contribuyen con dioxinas y hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs), que son productos químicos altamente tóxicos.
- Otros complementos que pueden afectar a la calidad del agua proveniente de la escorrentía urbana son iones principales como el sodio, cloruros, calcio, magnesio y potasio, así como la alcalinidad, dureza, pH, salinidad y temperatura del agua de lluvia que ya ha transcurrido por la cuenca urbanizada cargada de contaminantes.

En definitiva, “el problema de la contaminación de las escorrentías urbanas y de su vertido directo al medio natural es una cuestión grave que merece la misma atención que en su día requirió el tratamiento de aguas residuales. No obstante, la naturaleza intermitente del proceso de lluvia induce a encontrar soluciones que respondan correctamente con un funcionamiento discontinuo” (Perales & Andrés-Doménech, 2007). Además, según Valls y Perales (2008), en gran parte de las administraciones responsables apenas existe todavía concienciación de que el agua de lluvia también contamina y de forma nada despreciable.



Figura 10: Imagen de escorrentía urbana contaminada. Fuente: [www.aguavciudad.com](http://www.aguavciudad.com).

### 3. El drenaje urbano sostenible como medida de actuación

#### 3.1. Redes de drenaje urbano convencionales y sus limitaciones

Una vez se contempla la problemática a la que se enfrentan las localidades del litoral mediterráneo español en su globalidad, se puede entender que se trata de una situación única debido a la peculiar combinación de aspectos morfológicos y pluviométricos. Estos escenarios de inundación extrema, dada su anormalidad, deben ser abordados con un enfoque exclusivo. Al pretender subsanar un fenómeno muy particular con métodos convencionales, pueden darse dos situaciones: o se actúa desproporcionadamente por no entender la naturaleza de la exclusividad del problema o solo se llega a enmendar la situación parcialmente.

Históricamente se ha tendido a solucionar los problemas relacionados con las inundaciones en áreas urbanizadas restituyendo de forma artificial el drenaje natural existente en la cuenca, antes de que la ciudad perturbase el ciclo hidrológico en esta. Para evitar la acumulación de agua en las superficies impermeables, la escorrentía superficial generada es recolectada mediante una sucesión de imbornales a lo largo de las calles que transfieren los caudales precipitados hacia una red soterrada de colectores. Estos evacúan rápidamente el agua de lluvia hacia los cuerpos de agua receptores o plantas de tratamiento, haciéndola desaparecer de las zonas urbanas, junto con el paisaje hidrográfico previo a la urbanización. Diseñada la infraestructura para un caudal punta, un periodo de retorno determinado y un nivel de protección deseado, se evita que las calles realicen una función para la que no están diseñadas y se vean afectadas infraestructuras urbanas y transeúntes.

Las primeras redes de alcantarillado con función de recolección de aguas pluviales surgieron en ciudades europeas durante el siglo XIX, aunque con ellas se buscaba únicamente dar solución a los problemas sanitarios y epidemiológicos originados por la deficiente evacuación de aguas fecales. Posteriormente, se añadieron las estructuras necesarias para evacuar también las aguas residuales domiciliarias (en 1815 en Londres, 1833 en Boston y 1880 en París). Nacerían así las redes unitarias de drenaje, que se siguen utilizando a día de hoy. Estas empezarán a convivir, cerca de un siglo después, con las redes separativas que surgirán con la finalidad de mejorar el funcionamiento de las instalaciones de depuración. Durante años se han discutido las ventajas y los inconvenientes de proseguir con el drenaje unitario o avanzar hacia los modelos separativos, pero sigue sin existir consenso acerca de esto, ya que el sistema separativo tampoco hace desaparecer los problemas de cantidad ni calidad de la escorrentía (Perales & Andrés-Doménech, 2007). De modo que, a día de hoy, se lleva más de un siglo intentando evitar la inundación de nuestras ciudades enterrando las escorrentías (no eliminándolas) en colectores cada vez más grandes que discurren bajo nuestras calles. Por lo tanto, a medida que nuestras ciudades litorales continúan creciendo de mar a montaña, los colectores más antiguos no dispondrán de la capacidad necesaria para evacuar los caudales que vienen de aguas arriba que no existían cuando fueron dimensionados. Un mal funcionamiento de la red de alcantarillado puede originar grandes pérdidas económicas y sociales, por lo que se debe insistir en la búsqueda de los mejores métodos de drenaje que eviten los daños en las ciudades y que a su vez no supongan inversiones desproporcionadas a los ayuntamientos.

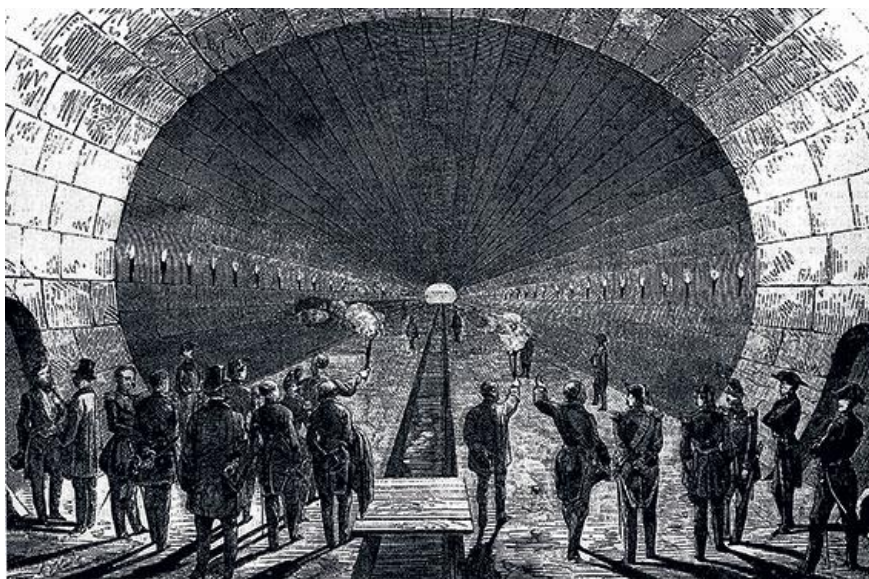


Figura 11: El Gran Colector Sebastopol (París) en un grabado que aparece en la revista Monde Illustré en 1858. Fuente: CEDEX.

Según la filosofía que reflejan las tendencias en el diseño de redes de recolección de aguas pluviales que se han desarrollado a lo largo de los siglos XIX y XX, la única actuación posible ante la problemática presentada es aumentar la capacidad de desagüe de los colectores. Es decir, construir o reconstruir el colector con nuevas dimensiones. Por lo tanto, según la concepción tradicional del drenaje pluvial urbano, nos encontramos en una situación en la que el carácter variable e impredecible de los eventos extremos de precipitación obliga a que las redes de drenaje pluvial artificiales estén notablemente sobre-dimensionadas para la inmensa mayoría del tiempo o a que cada cierto tiempo la ciudad sufra las consecuencias de las inundaciones. Esta solución es solamente efectiva a corto plazo, ya que llegará el punto en que, de nuevo, los colectores se vean colapsados por el crecimiento de la ciudad. Por otra parte, la alta densidad urbana de nuestras ciudades limita las dimensiones que pueden alcanzar los colectores. Además, la topografía mayoritariamente plana de las zonas litorales impide que se puedan alcanzar velocidades que permitan que, con el mismo diámetro de colector, se pueda conducir el mismo caudal. De modo que por falta de espacio disponible, en numerosas ocasiones, resultará imposible ampliar la red. Como destaca (Gómez, 2007), desde el punto de vista económico también aparecen dificultades, ya que implica la ejecución de nuevas obras, la propia rehabilitación de los colectores, obstruir el tráfico de vehículos y la reposición de otras líneas de servicios (luz, gas, agua, teléfono, etc.). Las obras de ampliación de la red de colectores de Barcelona (1986-1992), por ejemplo, supusieron un coste de 162 millones de euros. Es decir, que aumentar la capacidad de la red no es tan fácil como aumentar el diámetro de las tuberías que la componen; queda patente la dificultad asociada a rehabilitar el sistema de drenaje pluvial de manera eficiente. Dolz y Gómez (1994) comentan estas dificultades para mejorar el drenaje urbano.

A pesar de existir estas dificultades, existen técnicas accesorias que permiten optimizar el funcionamiento del conjunto de elementos que componen la red. En ocasiones se recurre al bombeo, mediante el cual se le puede otorgar al colector una mayor capacidad de la que tiene evacuando el agua de lluvia por gravedad. No obstante, esta solución implica labores de mantenimiento estrictas debido a que las bombas solamente serán necesarias en casos puntuales.



Además, al implementar bombeos el coste de las mejoras a la red se dispara; por lo que se tenderá a aplicar solo en casos en los que resulte estrictamente necesario.

Pero existe otro método para evitar la inundación de una ciudad cuando los colectores que componen la red de drenaje no tienen la capacidad suficiente para llevar a cabo su función de la manera más óptima posible, y es reducir la cantidad de agua que llega a ellos; es decir, disminuir la esorrentía aumentando la retención y la infiltración. Durante la última década del siglo XX y los inicios del XXI se ha optado por desarrollar alternativas de remodelación de los sistemas de drenaje urbanos por medio de técnicas de retención. Las infraestructuras de este tipo que han resultado más populares y han demostrado mejor su eficacia son los depósitos de tormenta y las balsas de laminación. Los depósitos de tormenta normalmente se sitúan en zonas altamente urbanizadas donde el espacio resulta muy valioso económicamente, por lo que se encuentran soterrados bajo la ciudad. “Constituyen una de las técnicas más habituales para reducir la magnitud de los caudales pico de esorrentía. Consiste en dedicar un espacio con cierta capacidad de almacenamiento para retener parte del volumen del hidrograma de caudal de esorrentía, reduciendo además por laminación el caudal pico que debe transportar la red de drenaje aguas abajo. Los volúmenes de agua almacenados pueden liberarse poco a poco una vez haya pasado la tormenta” (Gómez, 2007). Las balsas de laminación se construyen a cielo abierto aguas arriba o aguas debajo de las ciudades para laminar caudales antes de pasar por zonas con limitaciones de drenaje o para compensar la infiltración perdida por el proceso de urbanización. El Área Metropolitana de Barcelona es un buen ejemplo de estas prácticas; se implementaron tanto depósitos como balsas a partir del año 2005 gracias al Plan Director de Aguas Pluviales del Área Metropolitana de Barcelona (ACA, EMSHTR), que han demostrado ser notablemente efectivas. La principal contrapartida de estas técnicas es su elevado coste económico, la dificultad de obtener espacio en la trama urbana y el impacto que causa su construcción al funcionamiento de la ciudad en su día a día. Gago Lara (2010) trata detalladamente el diseño, construcción y explotación de los depósitos y balsas del Área Metropolitana de Barcelona.



Figura 12: Depósito de retención de aguas pluviales parcialmente lleno en Alicante. Fuente: EFE.



**Figura 13:** Depósito de retención de aguas pluviales Joan Miró en Barcelona. Fuente: Ajuntament de Barcelona.

Existe una variante de los depósitos de retención que consiste en aprovechar la capacidad de retención de los propios colectores que componen la red cuando estos no están siendo utilizados. Obviamente esta opción es únicamente válida si la red es lo suficientemente extensa para que haya una clara diferenciación espacial y temporal de la lluvia y por lo tanto existan colectores vacíos cuando otros se están viendo desbordados. También será necesario que la red cuente con los elementos de gestión y control necesarios; es decir, un sistema de compuertas y bombas (si son necesarias), junto con aparatos de medición y transferencia de la información del comportamiento hidráulico de los colectores a tiempo real.

La opción de disminuir la escorrentía aumentando la infiltración parece prácticamente imposible en ciudades densamente urbanizadas. Las zonas verdes en parques, plazas, etc. contribuyen a infiltrar el agua de lluvia que cae sobre ellas hacia el terreno natural, de modo que esa cantidad de agua no va a contribuir a colapsar los colectores de la red de alcantarillado. Pero desde un punto de vista global de la ciudad, las posibilidades de incrementar las zonas verdes de las ciudades del litoral mediterráneo español son demasiado escasas debido al poco espacio disponible. Por lo tanto parece poco probable que estas actuaciones, por si solas, puedan tener un efecto diferenciador de cara a resolver el problema de las inundaciones. Aun así, es en esta línea de actuación en la que han surgido las llamadas técnicas de drenaje urbano sostenible en las que se centra principalmente este trabajo. Estas combinan la filosofía detrás de las técnicas de retención con el aprovechamiento de las áreas verdes que favorecen la infiltración, para encontrar nuevos métodos que contribuyan a un mejor funcionamiento del sistema de drenaje urbano de las ciudades. Estas permiten también preservar el ambiente y mejorar la eficiencia del tratamiento de las aguas de lluvia. Tanto las técnicas LID como los sistemas de retención y laminación aquí comentados forman parte del enfoque sistémico y ambientalista en la hidrología urbana que surgió en las décadas de 1970-1980. Se busca una idea más integrada de los procesos; el drenaje de las aguas pluviales pasa a formar parte de lo que se llama la gestión integrada del agua pluvial.

## 3.2. Introducción al drenaje urbano sostenible

Recapitulando;

- Se ha detectado un problema, las frecuentes inundaciones en ciudades del litoral mediterráneo español y la consecuente contaminación de las aguas de escorrentía que serán vertidas en el medio natural receptor.
- La fuente del problema radica en una climatología variable, impredecible y devastadora, sumada a cuencas urbanas peculiarmente impermeables y densamente urbanizadas.
- Históricamente se ha gestionado y diseñado la evacuación de aguas pluviales por medio de sistemas convencionales (subterráneos) que, lejos de solucionar el problema, lo han ido empeorando a medida que las ciudades crecen. Estos desnaturalizan por completo el drenaje de la cuenca, perdiéndose los procesos hidrológicos del ciclo del agua.

Por lo tanto, “el drenaje urbano actual presenta problemas que pueden ser clasificados en tres categorías: cantidad, calidad y servicio” (Rodríguez, Rodríguez, Gómez-Ullate, & Castro, 2006). A continuación se describe el enfoque del drenaje urbano sostenible como una alternativa a los métodos tradicionales. Su objetivo es el de tratar el triple problema de raíz desde una perspectiva distinta.

### 3.2.1. Terminología

Como primera puntualización acerca de las técnicas de drenaje urbano sostenible se considera importante, para evitar confusiones o interpretaciones erróneas del mensaje que se pretende transmitir, que se haga un breve repaso sobre las diferentes terminologías que se han utilizado en los diferentes lugares y épocas para referirse a ellas. Fletcher y otros (2015) documenta la evolución de la terminología alrededor del drenaje urbano sostenible.

Debido a la creciente popularidad de las técnicas de drenaje urbano sostenible durante las últimas décadas, los estudios realizados se han ido complicando y especializando, y por ello la manera de referirse a ellos ha ido ganando diversidad. Términos diferentes han sido utilizados en diferentes partes del mundo y diferentes épocas para referirse a un mismo concepto. Este hecho ha derivado en solapes, contradicciones y confusión entre los diferentes términos. La comunidad de expertos y usuarios de la materia y otros campos relacionados sufre las consecuencias de la falta de comunicación dentro de la propia disciplina, en diferentes partes del mundo. A continuación se resume brevemente cuales son las diferentes terminologías que existen para referirse a las nuevas técnicas de drenaje urbano sostenible:

- “Low impact development” (LID) y “low impact urban design and development” (LIUDD): Este término se ha utilizado principalmente en América del Norte y Nueva Zelanda. El término lleva utilizándose desde 1977 para referirse a distintas prácticas relacionadas con la gestión de aguas pluviales, aunque su intención inicial era la dar nombre al uso de medidas de control para recuperar una hidrología “natural” en las ciudades.

- “Water sensitive urban design” (WSUD): El término se comenzó a utilizar en Australia a principios de los años 1990. En los primeros años su uso se ceñía exclusivamente a aplicaciones relacionadas con la gestión del agua de lluvia, aunque en los últimos años el término engloba otros aspectos del ciclo urbano del agua. En Australia se usa a menudo en conjunto con el término “water sensitive cities”.
- “Integrated urban water management” (IUWM): El concepto engloba tanto la gestión del agua de lluvia como de las aguas residuales, suministro de agua potable y aguas subterráneas. Se tienen en cuenta las perspectivas medioambiental, social, cultural y económica en un contexto local en el corto, medio y largo plazo. Se empezó a utilizar en los años 1990s.
- “Sustainable urban drainage systems” (SUDS) o “sustainable drainage systems” (SuDS): El nuevo enfoque de la gestión de aguas pluviales surge en el Reino Unido a finales de la década de 1980 y principios de los 1990s cuando CIRIA publica sus guías para el uso de una serie de técnicas de control de la escorrentía. El término se usa por primera vez en 1997 para referirse a este tipo de tecnología. En el año 2000 diversos manuales de diseño son publicados y el término se formaliza. En la actualidad el Manual de SuDS de CIRIA es el más popular y está en constante actualización.
- “Best management practices” (BMPs): Este término se usa en Norte América para describir principalmente medidas de prevención de la contaminación por parte de las aguas residuales. El término nace en 1972 e incluye prohibición de ciertas prácticas, procedimientos de mantenimiento, requerimientos de tratamiento, procedimientos de operación, prácticas de control de la escorrentía, vertidos, etc. El término BMP se ha incluido en la regulación de los EEUU, luego la mayor parte de estados lo adoptaron para sus guías sobre el control de aguas de lluvia.
- “Stormwater control measures” (SCMs): SCMs surge como alternativa al término BMPs debido a su creciente impopularidad por ser este último demasiado impreciso. A día de hoy no se ha conseguido sustituir completamente un término por el otro.
- “Alternative techniques” (ATs) or compensatory techniques (CTs): Se trata de un término utilizado en Francia, que surgió a principios de los años 1980s para describir nuevas tendencias en el drenaje urbano. Se trataba de soluciones más “naturales” que promovían, no solo solventar problemas de contaminación, sino también mejorar la calidad de vida en las ciudades.
- Otros términos que se pueden encontrar en la literatura son, por ejemplo, “Source control” o “Green infrastructure”.

El uso de cada uno de estos términos ha sufrido una evolución exponencial en el espacio y el tiempo. El interés por la disciplina está en auge y las miras dentro de la misma se están expandiendo hacia otros campos como la arquitectura, paisajismo, ecologismo y algunas ciencias sociales. La evolución del uso las diferentes terminologías con el tiempo se pueden ver en el siguiente gráfico:

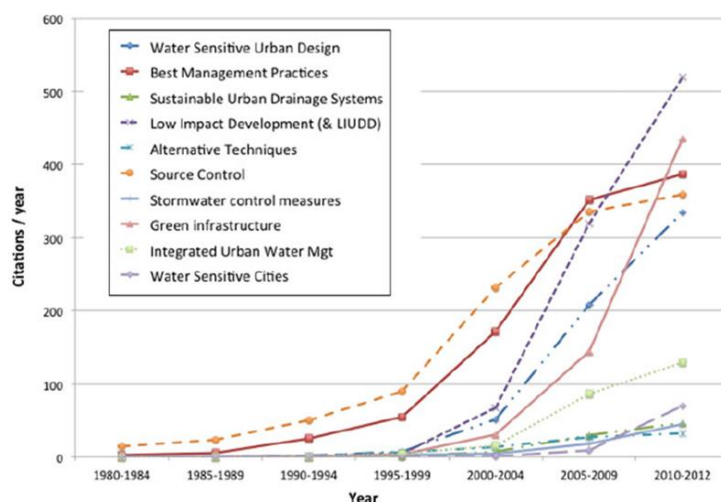


Figura 14: Evolución de la terminología sobre drenaje urbano entre 1980 y 2012 según las veces que fue citada cada una de ellas al año. Fuente: (Fletcher, y otros, 2015).

Así como el inicio de la mayoría de los términos es local, con el tiempo estos se han ido globalizando; hoy en día cada autor utiliza el término que considera más adecuado para el propósito de su estudio. Aun así, no se puede generalizar hasta el punto de considerar que todas las nomenclaturas definen exactamente el mismo concepto. Fletcher y otros (2015) los clasifica de la siguiente manera:

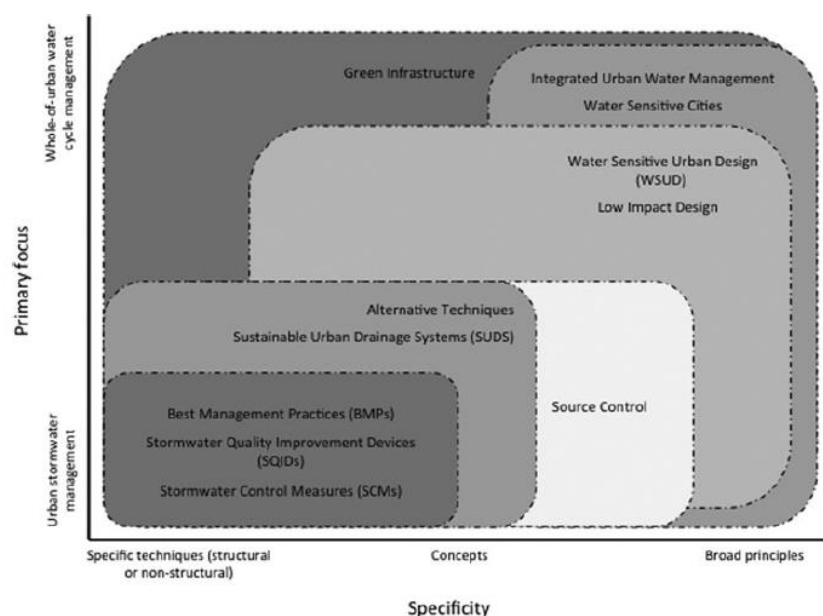


Figura 15: Clasificación de la terminología de drenaje urbano en relación al grado de especificación y su enfoque principal. Fuente: (Fletcher, y otros, 2015).



La elección de la denominación que se le van a dar a las técnicas de drenaje urbano sostenible en este trabajo se basa en la información que aporta Fletcher y otros (2015). El término buscado debe englobar tanto la gestión de las aguas pluviales como la del ciclo hidrológico en la ciudad al completo. Al mismo tiempo debe ser lo suficientemente preciso; en este trabajo se va a tratar sobre las técnicas concretas que nos ayudarán a obtener un mejor sistema de gestión de las aguas de lluvia, no solo de los principios y conceptos generales en los que se basan. Además, el término utilizado no debe estar en desuso. Por todas estas razones, en los siguientes apartados hablaremos sobre técnicas LID o “Low impact development”. Aunque en España el término SUDS ha gozado también de amplia difusión; este último ha sido promovido por el Grupo de Investigación en Tecnología de la Construcción (GITECO) de la Universidad de Cantabria.

### 3.2.2. Principios generales

En los apartados anteriores se ha visto como la manera en que diseñamos y construimos nuestras ciudades y gestionamos la escorrentía de las aguas de lluvia está provocando graves problemas; y si no se actúa en consecuencia estos no harán más que agravarse. La concepción tradicional del drenaje urbano se fundamenta simplemente en captar el exceso de escorrentía que la propia ciudad genera al alterar los procesos naturales de la cuenca. Durante siglos se ha aceptado que en cuencas urbanas los procesos que componen el ciclo hidrológico se pierden, por lo que se deben idear medidas artificiales para evacuar la escorrentía; lo que habitualmente va ligado a costosas infraestructuras. Las técnicas LID reman en dirección opuesta a los sistemas tradicionales de drenaje urbano. El drenaje urbano sostenible aboga por recuperar en la medida que sea posible el comportamiento de la cuenca previo a su urbanización y resguardar el ciclo natural del agua; entendiendo que imitando el drenaje natural de la cuenca se maximizan las oportunidades y beneficios de la gestión del agua superficial en las ciudades.

Los LID agrupan una serie de técnicas concretas que permiten combinar los procesos de infiltración, retención y evapotranspiración sobre todo para reducir la escorrentía superficial en las calles, y así ajustar la hidrología urbana a la natural. Existen LIDs de muchos tipos, superficiales o soterrados, con vegetación o sin, etc. Estas pueden perfectamente trabajar de manera conjunta con las redes de alcantarillado existentes, por lo que son totalmente compatibles con métodos de drenaje urbano convencionales. Su función a corto plazo es la de colaborar en una gestión más eficiente y sostenible de las aguas pluviales, pero los LID están concebidos para acabar substituyendo a las redes de colectores enterrados convencionales (Perales, 2008).

El manual “The SuDS Manual” de CIRIA (2015) concibe la filosofía detrás de las nuevas tendencias de drenaje sostenible como la maximización de los beneficios y minimización de los impactos de la escorrentía superficial en áreas desarrolladas. Es decir, se debe entender el agua superficial como un recurso valioso, y se debe gestionar de manera que colabore a aumentar la biodiversidad, belleza, tranquilidad y estética de edificios, lugares y paisajes que componen la ciudad. Ello puede ayudar a la ciudad a volverse más resiliente ante el cambio climático. Por otro lado, los LID deben ayudar a reducir la cantidad de escorrentía superficial de las áreas urbanizadas para una mejor gestión de los riesgos de inundación de las calles y contaminación de los cuerpos de agua receptores. Esto lo consiguen captando, infiltrando, retardando, almacenando y tratando la escorrentía proveniente de las aguas de lluvia.

Este cambio radical en el enfoque del drenaje urbano responde ante la concepción de la sostenibilidad como respuesta a los problemas derivados de la gestión de aguas pluviales llevada a cabo hasta la fecha. La ciudad sostenible busca la relación de la sociedad con el medio; con la ciudad y el territorio. Esto se puede conseguir por medio del agua a partir de la redefinición de la estructura hídrica en el desarrollo urbano; las técnicas LID engloban, junto con los principios hidrológicos e hidráulicos básicos de la hidrología urbana convencional, otros aspectos como la mejora del medio ambiente, la integración con el entorno y el diseño urbano.

En definitiva, la implementación de técnicas LID en nuestras ciudades es una respuesta ante la necesidad de actuación sobre los sistemas de gestión de aguas pluviales tradicionales, dado su funcionamiento deficiente. Este cambio de enfoque se basa en la transformación de problemas en oportunidades; considerar el agua de lluvia como un recurso en lugar de un elemento que molesta y del que hay que deshacerse rápidamente. Los objetivos que, en resumen, persigue un drenaje urbano más sostenible son, según Perales & Andrés-Doménech (2007), los siguientes:

- Proteger los sistemas naturales: proteger y mejorar el ciclo del agua en entornos urbanos.
- Integrar el tratamiento de las aguas de lluvia en el paisaje: maximizar el servicio al ciudadano mejorando el paisaje con la integración de cursos y/o láminas de agua en el entorno.
- Proteger la calidad del agua: proteger la calidad de las aguas receptoras de escorrentías urbanas.
- Reducir volúmenes de escorrentía y caudales punta: reducir caudales punta procedentes de zonas urbanizadas mediante elementos de retención y minimizando áreas impermeables.
- Incrementar el valor añadido minimizando costes: minimizar el coste de las infraestructuras de drenaje al mismo tiempo que aumenta el valor del entorno. Este es un tema que no ha sido demostrado con claridad y que se abordará en este documento.

#### 3.2.2.1. *Gestión jerarquizada*

Aunque la filosofía detrás de los LID se mantiene independientemente de la escala de actuación, existe una jerarquía para la aplicación óptima de las técnicas de drenaje urbano sostenible. El agua de lluvia debe de gestionarse a diferentes niveles para extraer el máximo potencial de los métodos que se utilicen:

- Prevención: La secuencia de la gestión empieza por la prevención. Medidas legislativas, de motivación, promoción etc. para concienciar a la población en cuestión de limpieza, reducción de las emisiones y aprovechamiento del agua pueden evitar futuros problemas y ahorrar esfuerzos innecesarios.
- Gestión en origen: En general resulta más beneficioso captar la escorrentía en el punto donde se genera, o lo más cerca posible. Los LID captan el agua muy cerca de donde cae, donde el volumen de agua recolectado y el potencial de contaminación es mucho menor. El control en origen es el más adecuado en áreas urbanizadas en las que el

espacio disponible es escaso y difícil de conseguir, ya que lo realizan técnicas LID habituales en la propiedad privada.

- Gestión en el entorno urbano: La escorrentía que no ha sido tratada en origen pasa a ser gestionada a un nivel más general, ya sea por medio de otras técnicas LID, que no actúan en origen, o redes de colectores convencionales. A este nivel se utilizarán técnicas capaces de gestionar un mayor volumen de agua. El agua que no puede ser tratada in situ debe ser transportada, ya sea porque requiere de un tratamiento específico o porque el drenaje natural en ese punto no es posible. Los objetivos a este nivel serán reducir la velocidad de la escorrentía y el pico de descarga.
- Gestión de cuencas: El último nivel de gestión es el de la cuenca al completo. Se trata de mantener una visión global de la gestión de las aguas pluviales de manera que se tenga en cuenta toda la escorrentía generada. Las actuaciones a este nivel consistirán en crear un paisaje multifuncional en el que el diseño LID se combine perfectamente con el medio que lo rodea (Gao, Liu, & Wang, 2013). En la gestión en cuencas se incluye el tratamiento final de la escorrentía en estaciones depuradoras, ya que, como podemos ver en la siguiente figura, se trata de la fase final de tratamiento; a partir de este punto los caudales se vierten al medio.

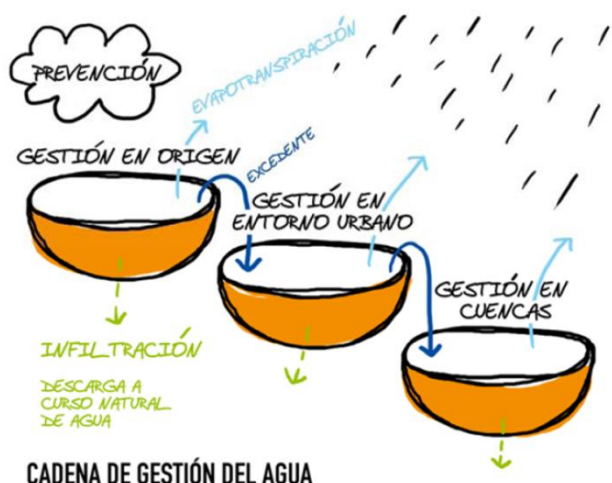


Figura 16: Cadena de gestión del agua en un sistema de drenaje LID. Fuente: (Perales & Andrés-Doménech, 2007).

Un método de gestión desde lo concreto hacia lo amplio permite actuar sobre los problemas en su raíz y, de esta manera, no arrastrarlos en el espacio y el tiempo permitiendo que se agraven. El tratamiento de la escorrentía a nivel local permite no tener que transportar el agua si no es estrictamente necesario.

El concepto de gestión jerarquizada promueve la división de la cuenca en sub-cuencas con características comunes, para optimizar la estrategia de drenaje en cada una de ellas. La escorrentía resultante de cada una de las sub-cuencas ya ha pasado por las dos primeras fases de la secuencia de gestión jerarquizada, luego los problemas a nivel de red general de drenaje se habrán reducido considerablemente.



El diseño de la gestión del agua de lluvia por medio de LIDs debe hacerse de manera equilibrada, estableciendo un nivel de riesgo asumible, entendiendo los riesgos asociados a cada una de las acciones.

### 3.3. Beneficios de las técnicas LID

Como ya se ha introducido, la aplicación de las técnicas LID debe estar enfocada en todo momento a conseguir una gestión de la escorrentía superficial que maximice los beneficios hacia la ciudad y sus actividades. Los beneficios que se pueden conseguir con la aplicación de los LID son muy variados y dependerán de múltiples factores locales y de diseño de los mismos; a grandes rasgos, CIRIA propone en su manual una división de estos en cuatro categorías: beneficios en el control de la cantidad de agua, en la gestión de la calidad de la escorrentía para prevenir la contaminación, crear y mantener mejores lugares que ofrecer a los ciudadanos y crear y mantener lugares más respetuosos con la naturaleza.

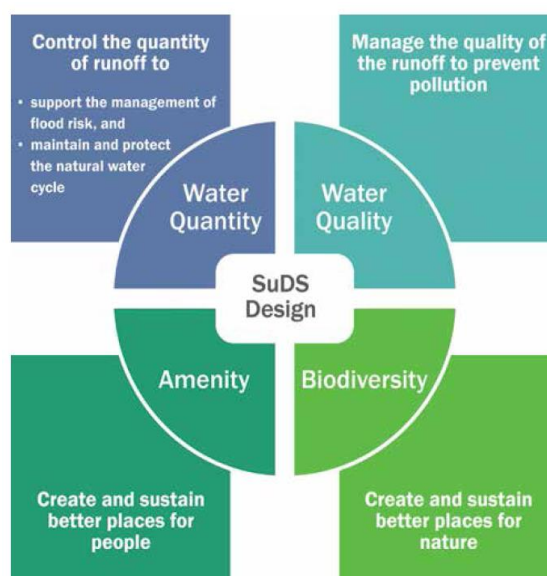


Figura 17: Los cuatro pilares en el diseño de LIDs según CIRIA.

#### 3.3.1. Cantidad de agua

Este trabajo se centra principalmente en el uso de LIDs como herramienta de prevención de eventos de inundación peligrosos para la ciudad y sus habitantes. Ya conocemos por qué y cómo se dan los problemas de inundación en las ciudades del litoral mediterráneo español, y como se ha encarado históricamente esta situación. De modo que, si queremos paliar los efectos de las inundaciones en nuestras ciudades, deberemos centrarnos en controlar esencialmente dos aspectos:

- Lo rápido que se evacúa la escorrentía del sistema de drenaje pluvial, es decir, el pico del hidrograma de salida.
- El volumen total de escorrentía que se evacúa.

Dado que el objetivo es recuperar la hidrología local previa al desarrollo urbanístico, se debe intentar imitar un hidrograma de salida de la escorrentía similar al que existe en cuencas naturales.

Los LID se diseñan y dimensionan para, en cada situación, ser capaces de gestionar velocidad y volumen de escorrentía en función de las condiciones climatológicas y geológicas locales. De todos los efectos negativos de la urbanización de una cuenca natural sobre la hidrología regional, las técnicas LID son capaces de revertir algunos ayudando a la recuperación de los acuíferos, manteniendo el aporte subterráneo de agua a los ríos y cauces, reduciendo la erosión aguas abajo, etc. Las técnicas LID cumplen los dos propósitos comentados mediante principalmente atenuación e infiltración del flujo de agua.

La atenuación de la escorrentía se lleva a cabo mediante la retención de parte del volumen de agua precipitado desde el momento en que cae. La mayoría de elementos LID disponen de capas preparadas para almacenar el agua que cae sobre ellos o incluso parte de la lluvia caída en otras partes de la calle. De esta manera se reduce y ralentiza la escorrentía en las calles mientras llueve y se libera posteriormente con el caudal deseado hacia la red de colectores soterrados. Como se muestra en la siguiente figura, el pico del hidrograma de descarga se consigue aplanar e igualar al que existía antes de que aparecieran los efectos del desarrollo urbanístico de la cuenca:

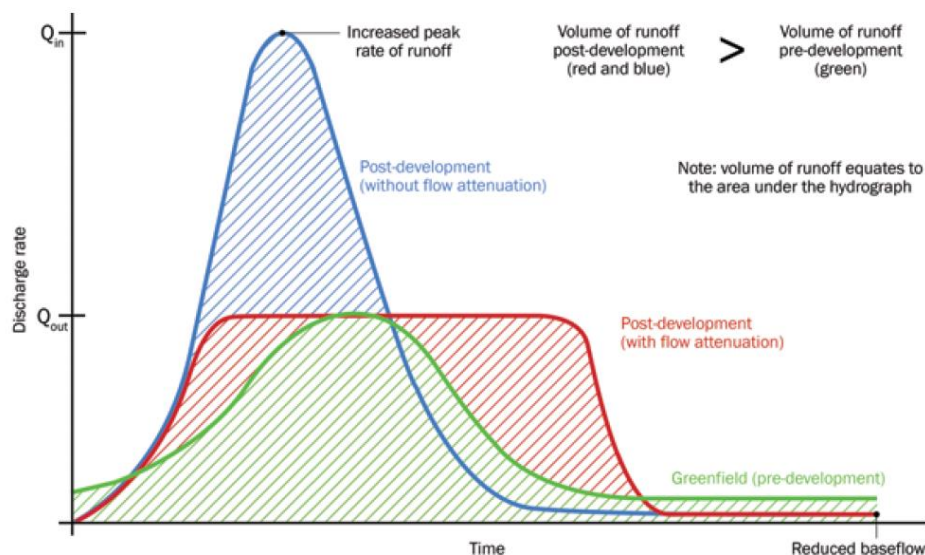


Figura 18: Comparación entre los hidrogramas en la salida del sistema de drenaje urbano para el caso previo a la urbanización (verde), posterior a la urbanización (azul) y con medidas de atenuación (rojo). Fuente: “The SuDS manual” de CIRIA.

Pero el volumen total liberado sigue siendo el mismo, luego retener la escorrentía durante un tiempo no es suficiente para maximizar el beneficio en cuestión de mitigación del riesgo de inundación. Además, la actuación sobre el pico de caudal solamente aportará beneficios para casos de lluvia extrema; para eventos de precipitación habituales la escorrentía solamente pasará a través de las capas de atenuación. Para reducir el volumen excedente de la red de colectores se debe favorecer la infiltración al terreno natural o su reutilización.

En lo que se refiere a la capacidad de las técnicas LID de favorecer la infiltración, cobra un protagonismo especial la geología de la cuenca. En una zona donde el suelo existente bajo la ciudad es arcilloso, incluso antes de ser urbanizada, la escorrentía superficial en la cuenca ya era elevada. Luego quizás recuperar los caudales previos a la existencia de la ciudad sigue sin solucionar los problemas de inundación existentes y será necesario buscar un criterio que proporcione un beneficio real. En suelos más permeables, el beneficio obtenido con medidas que favorezcan la infiltración será mucho más notable. Existen también técnicas LID que tienen la función de recolectar parte del agua de lluvia con el objetivo de recuperarla para su reutilización en tareas como limpieza o regadío. Pero la magnitud del beneficio que se puede obtener de estas prácticas es, por lo general, inferior a la que aporta la infiltración. Aun así, la reutilización de la escorrentía es un concepto que se ha estudiado ampliamente en el contexto de la gestión integrada de los recursos hídricos; Suárez y otros (2014) desarrolla el concepto de gestión integral y global del agua urbana, donde los LID juegan un importante papel.

Por lo tanto, las técnicas LID que se apliquen en una ciudad, deberán ser diseñadas y dimensionadas de manera que dispongan del volumen útil de almacenamiento necesario para retardar y reducir lo máximo posible el pico de escorrentía, mientras que disponen de la superficie necesaria como para que el agua almacenada sea capaz de infiltrar en el terreno. Este es un aspecto primordial a la hora de diseñar la infraestructura, ya que los condicionantes climáticos juegan un papel relevante en ello; y como sabemos, las precipitaciones son altamente variables e impredecibles en zonas del Mediterráneo occidental. Al reducir el riesgo de inundación de las calles, los LID contribuyen a disminuir los daños y pérdidas económicas que provocan dichos eventos comentados en secciones anteriores.

### 3.3.2. Calidad del agua

Aunque no es la motivación prioritaria del estudio que pretende llevarse a cabo en este trabajo, no se debe olvidar que uno de los principales objetivos detrás del uso de LIDs y una de las causas de su creciente popularidad es su capacidad de mejorar la calidad del agua proveniente de la escorrentía urbana. Los LID son capaces de tratar y limpiar la escorrentía superficial en áreas urbanas para proteger los cuerpos de agua receptores y la flora y fauna asociadas a estos.

Uno de los atractivos que tiene tratar la contaminación mediante LIDs, que no existe si únicamente tratamos la escorrentía en plantas depuradoras, es que podemos prevenir gran parte de la contaminación de las aguas receptoras mediante el tratamiento del agua en origen; es decir, tratarla antes de que pueda recorrer las calles. Las técnicas que realizan el control in situ son de sencilla aplicación pero deben planificarse con una visión de conjunto para evaluar el efecto global sobre la cuenca. Al disminuir el agua tratada por las depuradoras se reducen gastos en este tipo de tareas.

Esta función de los LID es llevada a cabo por medio de una compleja combinación de agentes biológicos, químicos y físicos. A continuación se mencionan algunos de los procesos mediante los cuales las técnicas LID son capaces de retener y/o eliminar los contaminantes de la escorrentía urbana:

- **Adsorción:** Es un proceso por el cual átomos, iones o moléculas son atrapados o retenidos en la superficie de un material. En este caso, la adsorción es el fenómeno en el que el contaminante (adsorbato) es eliminado del agua mediante el contacto con el medio poroso, la vegetación o sólidos en suspensión en el agua (adsorbente).
- **Sedimentación:** Los materiales sólidos en suspensión transportados por la escorrentía urbana sedimentan al reducirse la velocidad del flujo de agua, al entrar en los sistemas de drenaje sostenible. Tradicionalmente los sólidos contenidos en el agua de escorrentía son arrastrados hasta el cuerpo de agua receptor por las altas velocidades que alcanza el agua en los colectores. Además, muchos de los contaminantes contenidos en la escorrentía urbana circula en conjunto con el sedimento, luego este proceso es doblemente efectivo.
- **Filtración:** Se trata del proceso de tamizado que se produce al circular el agua por el medio poroso del LID. Las partículas de contaminante quedan atrapadas en mayor o menor medida en función de la porosidad del material utilizado en el LID. La contrapartida de este proceso es la progresiva colmatación del medio poroso, lo que requiere constante mantenimiento. Los materiales geotextiles también contribuyen en este proceso.
- **Bio-filtración:** Consiste en la filtración biológica de la escorrentía a su paso por la vegetación. El agua de lluvia es tratada a través de su interacción con la vegetación, cuyas estructuras vegetales atrapan el material suspendido. Su eficiencia dependerá de la densidad de vegetación.
- **Biodegradación:** Se trata de la descomposición natural de una sustancia por la acción de agentes biológicos. Los microorganismos están presentes en procesos de descomposición de contaminantes como la descomposición de materia orgánica, la nitrificación, la desnitrificación, la precipitación, etc. La presencia de condiciones aeróbicas y anaeróbicas en los LID establece el escenario para la aparición de microorganismos que contribuirán a la eliminación de contaminantes.
- **Precipitación:** Es el proceso por el cual se forman precipitados insolubles en el agua acumulada en el LID, los cuales acaban siendo depositados. Puede producirse de manera directa o a través de la previa adsorción de la materia soluble y posterior deposición. Depende de factores como el pH del agua, su dureza, etc.
- **Bio-acumulación:** Consiste en el proceso de incorporación de parte de una sustancia química a los seres vivos. Las plantas son capaces de bio-acumular metales pesados, nutrientes y otros contaminantes. El factor determinante es el tiempo de contacto del contaminante con la planta, principalmente con la raíz.
- **Volatilización:** Ciertos compuestos pueden ser convertidos en gas a lo largo de su tratamiento en los LID, sobre todo en compuestos derivados del petróleo y ciertos pesticidas.

### 3.3.3. Biodiversidad

El papel que juegan los LID a nivel de biodiversidad es el de acercar la ciudad y su gente a la naturaleza. Implementando técnicas LID se crean nuevos hábitats y se rehabilitan o promocionan los existentes, a la vez que los ecosistemas asociados proveen un entorno saludable y estimulante. El agua que retienen los elementos del LID se convierte en un recurso de la ciudad, valioso y esencial para el crecimiento y desarrollo de una gran variedad de animales y plantas.

Cualquier esquema o diseño LID aporta un beneficio en términos de biodiversidad, pero el valor añadido lo proporcionarán aquellas técnicas LID que formen parte de un gran espacio verde; estos serán capaces de aportar un hábitat y conectividad a la vida animal. Este será, sin embargo, uno de los puntos de más difícil consecución en las densas, altamente impermeables y pequeñas cuencas de las localidades costeras mediterráneas. Por lo tanto, con un diseño adecuado de los LID, que tenga en cuenta su valor biológico, estos pueden proporcionar oportunidades de cobijo, comida y cría a una gran variedad de especies incluyendo plantas, anfibios, invertebrados, aves y algunos mamíferos.

En definitiva, un diseño en favor de potenciar los beneficios en términos de biodiversidad de los LID ofrecerá los siguientes beneficios:

- Apoyo y protección al hábitat natural local de las especies.
- Contribución a la consecución de los objetivos de biodiversidad locales contemplados en los marcos y estrategias de actuación.
- Contribuir a la conectividad de hábitats entre espacios verdes dentro de la ciudad.
- Creación de ecosistemas diversos, resilientes y autosuficientes.

### 3.3.4. Calidad de vida

El diseño urbanístico tiene como objetivo crear ambientes urbanos atractivos, agradables, útiles y habitables, que apoyen y potencien la comunidad. El agua forma parte del entorno urbano y su gestión es una actividad de importante valor en su contribución a la creación de entornos habitables. Aun así, la percepción ciudadana de las labores de gestión del drenaje urbano no ha sido tradicionalmente tan positiva como hacia otras disciplinas que participan en la planificación urbanística. Esto se debe a que es difícil que el ciudadano valore la voluntad política y capacidad técnica que hacen posible una red de colectores que permanece escondida en el subsuelo, cuya propia naturaleza no contempla el contacto directo con el ciudadano y por lo tanto le resulta difícil valorar su correcto funcionamiento. Por el contrario, normalmente es una deficiencia en dicho funcionamiento lo que concita la atención pública y la posterior sensibilización administrativa para la búsqueda de soluciones (Dolz & Gómez, 1994). No obstante, el agua es un recurso valioso, y la gestión de las aguas pluviales y la escorrentía en

cuencas urbanas pueden pasar a ser una parte vital de la percepción del urbanismo gracias a las técnicas LID.

Utilizar las técnicas de drenaje urbano sostenible para ayudar a estructurar el paisaje urbano enriquece su valor estético y recreacional promoviendo salud, bienestar y la infraestructura sostenible. La gestión de la escorrentía en superficie puede ayudar a reducir las temperaturas en verano, actuar como recurso para los programas en educación medioambiental, así como influenciar al sentido de comunidad y prosperidad en el área. Los LID proveen oportunidades para que el agua sea visible y oíble. Al igual que para la biodiversidad, los beneficios serán más amplios si los LID forman parte de un gran espacio verde.

De modo que los LID proporcionan oportunidades multifuncionales y colaboran en la creación de lugares habitables y, al fin y al cabo, calidad de vida. Algunos ejemplos de beneficios en calidad de vida que aportan los LID son los siguientes:

- Mejora de la calidad del aire: El agua y las plantas que contienen limpia el aire de las calles de partículas.
- Regulación de temperaturas del aire y edificios: El agua que contienen ayuda a moderar las temperaturas extremas, lo que va a convertirse en una cuestión primordial dado el cambio climático.
- Reducción de emisiones de carbono: Las plantas y suelos que contienen toman y almacenan el CO<sub>2</sub>, junto con otros gases de efecto invernadero. Los LID requieren menos energía en las diferentes fases de la cadena de suministros y su ciclo de vida que los sistemas de drenaje convencionales. El reciclaje del agua almacenada también ahorra energía.
- Recuperación de zonas de frágil equilibrio: Zonas con un déficit en recursos hídricos por la sobreexplotación que sufren revalorizan el entorno urbano mediante la recuperación de acuíferos y humedales en vías de desaparición.
- Cohesión comunitaria: Incrementando las oportunidades de interacción humana y creando ambientes recreacionales, la gente es más propensa a sentir que pertenecen a la comunidad y enorgullecerse de su vecindario.
- Economía e inversión: Los lugares atractivos tienden a fomentar la inversión. La productividad tiende a ser impulsada en ambientes atractivos. Se ha demostrado que los LID añaden valor al territorio y las propiedades de su alrededor. Estos también pueden generar interés al turismo.

La consideración del agua de precipitación como un recurso disponible disminuye el gasto en captación y obras hidráulicas, siempre que sea posible su aprovechamiento en cantidad y calidad

- Educación: Proporcionan múltiples oportunidades para promover la educación tanto en escuelas como en la comunidad como conjunto acerca del respeto por el medioambiente.
- Salud y bienestar: Proporcionan lugares para el esparcimiento y la relajación, lo que ayuda a mantener la salud física y mental.



- Reducción de ruido: Algunos LID crean barreras y superficies absorbentes de ruido.

Las ventajas que ofrece un drenaje urbano sostenible por medio de la implantación de la filosofía detrás de las técnicas LID parecen abundantes y trascendentes. Pero “para poder disfrutar de los múltiples beneficios de los LID necesitamos sensibilizarnos todos, empezando por los técnicos responsables del planeamiento y diseño de nuestras ciudades, para posteriormente concienciar al ciudadano y a la clase política, y conseguir introducir estas técnicas en la normativa urbanística de municipios y comunidades. Regulando la gestión de la lluvia, además de en el espacio público, en el privado, a través de normativa edificatoria” (Valls & Perales, 2008).

En definitiva, los LID colaboran, desde el ámbito de actuación que les corresponde, en lograr una interacción positiva entre los desarrollos residenciales y el medio en que se proyectan. Aportan su grano de arena a una gestión eficaz de los recursos naturales para disminuir los impactos negativos de la urbanización. Este tema lo trata en profundidad Higuera (2013): “Si se proyecta ignorando los condicionantes del soporte y del clima, el resultado provocará una disfuncionalidad importante, mayores impactos sobre el suelo, la flora y la fauna, y una menor eficiencia del sistema urbano proyectado”.

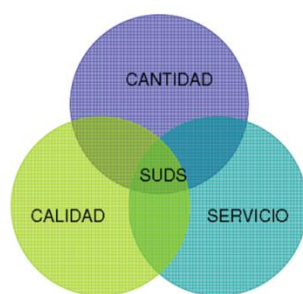


Figura 19: Triángulo de sostenibilidad en el drenaje urbano. Fuente: (Rodríguez, Rodríguez, Gómez-Ullate, & Castro, 2006). Concepto adoptado en la cumbre de Río (1992).

### 3.4. Inconvenientes de las técnicas LID

A pesar de los múltiples beneficios que aporta la progresiva implantación de sistemas de drenaje sostenible en las ciudades y lo mucho que se ha avanzado en su estudio, estas siguen siendo un terreno ampliamente inexplorado. Se trata de técnicas relativamente nuevas y, pese a la extensa investigación que se ha ido realizando en las últimas décadas, no se ha logrado aún afirmar categóricamente que estas puedan ser una alternativa real a las redes convencionales de drenaje urbano. Existen experiencias en las que demuestran un funcionamiento realmente bueno, pero también se conocen casos en los que no han alcanzado el nivel esperado. Es precisamente la relativa inexperiencia con ellos el inconveniente del que derivan todos los demás e impide su amplia implantación:

- Son muy escasos los datos disponibles acerca del funcionamiento de las técnicas LID después de largos periodos de tiempo en operación.



- Existe un amplio desconocimiento de las prácticas relacionadas con una ejecución adecuada de su construcción.
- Su uso es limitado si el nivel freático es próximo a la superficie y en zonas de pendiente elevada.
- Es muy probable que los gastos de mantenimiento crezcan con los años por problemas muy específicos como los relacionados con la colmatación de los medios porosos.
- Los manuales de buenas prácticas específicos para LIDs son escasos y de poca difusión.
- Su monitorización y análisis puede aumentar los costes.
- La mayoría de modelos de gestión de drenaje pluvial urbano que existen a día de hoy no están preparados para modelar las técnicas LID de manera que se pueda evaluar su funcionamiento de manera precisa. Las últimas versiones de EPA-SWMM si lo incluyen y se tratará el tema más adelante.

Wong (2006) resume los impedimentos que dificultan la entrada del drenaje urbano sostenible en las prácticas habituales: la fragmentación institucional, la dilución de responsabilidades, la falta de incentivos, el poco compromiso con las organizaciones, la dependencia del desarrollo tecnológico, una capacidad limitada de la sociedad para participar de forma efectiva y sobretodo la falta de experiencia y conocimiento de la manera de llevarlo a cabo.

Todos estos puntos generan desconfianza hacia los LID e impiden la puesta en marcha de proyectos de drenaje urbano sostenible. A continuación se muestra la comparación que el informe 5.1 del programa Daywater (Revitt, Ellis, & L., 2003) establece entre el sistema de drenaje convencional y un sistema LID; destaca los beneficios que aporta el drenaje sostenible sin olvidar la falta de desarrollo de estos sistemas:

	Sistema de colectores	LIDs
Coste de construcción	Puede ser equivalente pero el potencial de uso multifuncional de los LIDs puede reducir el coste global	
Coste de operación y mantenimiento	Establecido	Poco claro para algunos sistemas: se requiere investigación adicional al respecto
Control de inundaciones en origen	Si	Si
Control de inundaciones y erosión aguas abajo	No	Si
Potencial para reutilización del agua	No	Si
Potencial para recarga de acuíferos	No	Si
Potencial para eliminación de contaminantes	Bajo	Alto
Beneficios educacionales	No	Si
Funcionamiento a lo largo de la vida útil	Establecido	No establecido para algunos sistemas: se requiere investigación adicional al respecto
Espacio en superficie requerido	No significativo	Depende del tipo de sistema: varía entre significativo y substancial
Criterios de diseño	Establecido	No establecido para algunos sistemas: se requiere investigación adicional al respecto

Tabla 1: Comparativa entre el sistema de drenaje convencional y el sistema alternativo LID. Fuente: (Revitt, Ellis, & L., 2003).

Además, la directa dependencia de la climatología y las condiciones geológicas que sufren los LID se traduce en que su aplicabilidad en diferentes regiones y ciudades del mundo será muy dispar. Por lo que respecta al ámbito de este trabajo, existe una cierta precaución a la hora de anunciar las ventajas de aplicar LIDs en zonas del litoral mediterráneo español. Es razonable un cierto escepticismo en relación a los beneficios aportados por los LID en nuestras ciudades, debido a las peculiaridades urbanísticas y climatológicas ya comentadas. Esto se debe a la simple razón de que un evento tormentoso de un periodo de retorno moderado genera tal volumen de agua, en un lapso de tiempo tan reducido, que el espacio dedicado al almacenamiento en los LID sería desproporcionado y el subsuelo no sería capaz de infiltrar el agua de lluvia al ritmo necesario para evitar la inundación de las calles. Se suma a esto el hecho de que las cuencas urbanas están tan densamente edificadas que encontrar la superficie necesaria para implementar las técnicas LID necesarias parece tarea imposible. El reto que se presenta es el de dilucidar si, a efectos prácticos, los LID son una alternativa real al drenaje pluvial convencional o por el contrario una sofisticación innecesaria, inefectiva y utópica reservada a los países nórdicos (donde sí se cumplen los requisitos para un funcionamiento óptimo).

Por lo tanto, en el marco teórico de un régimen de lluvias de intensidad moderada y constantes en el tiempo, y ante la premisa de que se dispone del espacio en superficie necesario, las técnicas LID demuestran ser el futuro del drenaje urbano. Pero si estos axiomas no se cumplen y, aun así, se apuesta por este nuevo enfoque en la gestión de las aguas pluviales en ambientes urbanos, ¿Será el beneficio real el que tanto se alaba hoy día? ¿Es la filosofía detrás de los LID de aplicabilidad universal o debe este aspecto ser matizado? En próximos capítulos se ahondará sobre estas cuestiones.

### 3.5. Tipología

La clasificación de las numerosas técnicas LID que existen puede realizarse de diversas maneras, pero los investigadores de la materia suelen coincidir en que la principal división se debe hacer entre medidas estructurales y no estructurales.

#### 3.5.1. Medidas no estructurales

Las medidas no estructurales se caracterizan por no implicar directamente la construcción de infraestructura de ningún tipo ni actuaciones sobre la red existente. Estas podrían ser englobadas por la, anteriormente mencionada, primera fase de la gestión sostenible de la escorrentía urbana; la prevención (capítulo 3.2.2.1. *Gestión jerarquizada*). Aun así, son medidas que claramente colaboran en la consecución de los objetivos perseguidos por el drenaje urbano sostenible, que se vienen comentando en este capítulo.

### Medidas para minimizar la escorrentía

- Minimizar las zonas pavimentadas: Al reducir el porcentaje de área impermeable en la ciudad aumenta la infiltración y acercamos el comportamiento de la cuenca al de su estado natural, previo a la urbanización. Se trata de una medida muy efectiva pero considerablemente difícil de implementar, ya que habitualmente no vamos a encontrar espacio disponible para ello en zonas densamente urbanizadas. En áreas de nueva urbanización se debe tener en cuenta este aspecto a la hora de planificar y diseñar las superficies impermeables.
- Direccionar la escorrentía a zonas verdes existentes: Si conseguimos que las zonas permeables que ya existen en la cuenca urbana, por pequeñas que sean, reciban escorrentía generada en áreas impermeables mejoraremos el rendimiento que se le saca a estas zonas verdes. Por ejemplo, conectando las bajantes de los tejados o drenando las calzadas hacia los céspedes circundantes.

### Medidas para mejorar la limpieza

Como ya se explicó, el “first flush” arrastra la gran parte de los contaminantes que acaban siendo vertidos al medio receptor. Luego si somos capaces de prevenir, en la medida de lo posible, la contaminación de las calles, una menor cantidad de ellos serán transportados por la escorrentía. Un buen mantenimiento de las áreas impermeables en las calles prevendrá en gran medida la contaminación de los cuerpos de agua receptores. Algunas de estas medidas concretas son las siguientes:

- Educación: Informar a la población del problema en la gestión del agua y concienciar sobre los peligros de ensuciar las calles en términos de contaminación. De esta manera se promueve una conducta cívica y respetuosa con el medio ambiente y se hace al ciudadano partícipe de la gestión del agua en la ciudad. Educar sobre las consecuencias de unas calles no lo suficientemente limpias puede contribuir a reducir la carga contaminante que será vertida al medio.

Los fertilizantes, herbicidas i pesticidas deben ser utilizados con moderación i lejos de donde puedan ser transportados por la escorrentía. Los excrementos de animales, escombros, etc. pueden ser recogidos de manera eficiente y mantenidos lejos de los sistemas de drenaje. En definitiva, se trata de cambiar los hábitos que contribuyan a reducir la carga de contaminantes en las calles.

Además se puede promover la utilización de técnicas LID estructurales domésticas, de manera privada.

Otras prácticas enfocadas en esta dirección podrían ser campañas publicitarias y de concienciación o programas de participación ciudadana.

- Mantenimiento: Limpieza y mantenimiento frecuentes tanto de la infraestructura de drenaje existente (arquetas, colectores, pozos, depósitos, etc.) como de las propias calles, aparcamientos y otras zonas impermeables. Controlar las zonas en obras para evitar el arrastre de sedimentos será asimismo importante.

Además, será imprescindible también el correcto mantenimiento y control de las propias técnicas LID estructurales para asegurar su funcionamiento a lo largo del tiempo.

- Controlar las conexiones ilegales al sistema de drenaje: Se debe evitar que se conecten aguas residuales domésticas a la red de drenaje de pluviales, en redes separativas.
- Contención: En el caso de sustancias especialmente contaminantes, se deben asegurar procedimientos de actuación y el equipamiento necesario en el caso de vertido accidental. Se debe evitar que estos componentes alcancen la red de drenaje.

### 3.5.2. Medidas estructurales

Las medidas estructurales, por otro lado, son aquellas que implican en mayor o menor medida algún elemento constructivo. Estas formarán parte de la infraestructura de drenaje urbano; gozan de gran popularidad y están siendo ampliamente investigadas. La catalogación de las medidas estructurales no es única; no existe un consenso universal que establezca unos criterios, ya que muchas de las técnicas comparten principios y procesos y pueden considerarse equivalentes. También la denominación que recibe una misma técnica podrá variar según el autor. A continuación se presenta una posible clasificación, basada en la que hace CIRIA en su “The SuDS manual”:

#### 3.5.2.1. Tejados verdes

##### Descripción general

Los tejados verdes, más conocidos como “Green Roofs” son un método de almacenamiento de agua de lluvia in situ mediante la siembra de vegetación en cubiertas de edificios. Sus beneficios no solo se ciñen al ámbito de la hidrología urbana sino que potencian un funcionamiento eficiente del propio edificio. Las cubiertas y tejados en las ciudades suponen alrededor del 32% de la superficie de las mismas, por ello los tejados verdes ofrecen un gran potencial para recuperar y mejorar la hidrología de las ciudades (Andrés, y otros, 2014).

Se trata de un sistema multicapa colocado en las cubiertas de los edificios dónde la capa superficial consiste en un sustrato que permite el crecimiento de vegetación. Las diferentes capas trabajan en conjunto con el objetivo de interceptar y almacenar la mayor cantidad de aguas pluviales posible y, al mismo tiempo, retener contaminantes. Parte del agua interceptada se podrá eliminar mediante la evapotranspiración a través de las plantas.

Además reducen los niveles de ruido, actúan como aislante térmico del edificio y compensan el efecto “isla de calor” de las ciudades. Con ello permiten reducir los costes energéticos gracias al efecto aclimatador de las plantas y el sustrato, a través de la evapotranspiración. Estas propiedades dependerán de la cantidad de agua almacenada por el tejado. Los tipos de tejados verdes se dividen principalmente en:

- Tejados extensivos: La capa de sustrato es fina (entre 2 y 15 cm.), y por lo tanto, las cargas que deberá soportar la estructura, menores. El tipo de vegetación a plantar será sencilla (de tipo herbáceo o musgoso) y los requerimientos de mantenimiento menores, por ello son aplicados en una gran variedad de localizaciones. Por estos motivos, esta es la tipología más utilizada en rehabilitación de tejados. Tienden a no ser accesibles y pueden ser planos o inclinados.
- Tejados intensivos: La capa de sustrato es más profunda (mayor a 15 cm.) y tienden a admitir una amplia variedad de plantaciones (algunos incluso arbustos y árboles pequeños, aunque estas requieren un mantenimiento más constante. Las cargas que suponen para la estructura son notables y por ello su uso se suele limitar a edificios de nueva construcción. Normalmente son accesibles.

Los tejados verdes se conforman mediante la superposición de capas de diferentes materiales con el objetivo de obtener una cobertura vegetal y características drenantes. Los componentes de estas capas dependerán del tipo de tejado verde y de los condicionantes locales, pero habitualmente se incluirán las siguientes capas, en orden ascendente:

- Membrana impermeable: Impedirá que el agua contenida en las capas superiores alcance la estructura del edificio.
- Membrana anti raíces: Asegura que las raíces no dañen la membrana impermeable.
- Capa drenante: Será la que cumpla, principalmente, la función de almacenamiento del agua de lluvia y de drenaje del excedente de agua hacia la bajante del edificio. Puede estar formada por un material granular muy poroso o por elementos modulares/sistemas laminares.
- Geotextil: Normalmente se situará entre la capa drenante y el sustrato para que el segundo no contamine al primero con finos. Deberá ser de alta permeabilidad para no influir en el proceso de filtrado del agua.
- Sustrato: Capa de suelo que permita el crecimiento de vegetación. El tipo de material escogido deberá ser razonablemente permeable, resistente al calor, congelación y retracción y aceptable en términos de contenido de nutrientes.
- Vegetación

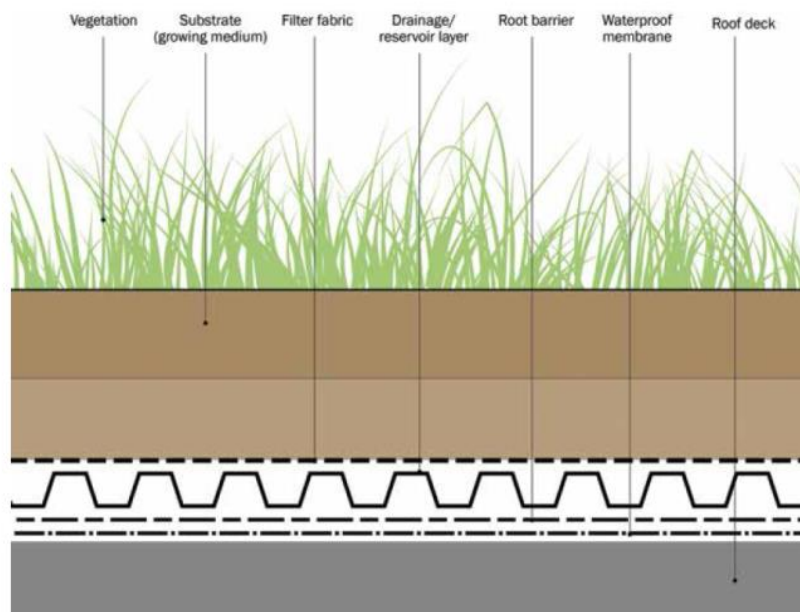


Figura 20: Sección de los componentes típicos de un tejado verde extensivo. Fuente: “The SuSD manual” de CIRIA.

### Criterios de diseño

Los beneficios en términos de reducción y retardo de la escorrentía, por parte de los tejados verdes, dependen de si primará la cantidad de agua evapotranspirada o almacenada respectivamente. Por ello, su eficiencia será mucho mayor cuando los eventos de lluvia no excedan un cierto umbral; en cuanto se supere la capacidad máxima de almacenamiento, todo el excedente pasará a convertirse en escorrentía y el tejado verde pasará a ser equivalente a un tejado convencional. Por lo tanto, se puede afirmar que la capacidad de los tejados verdes de reducir el pico del hidrograma de salida y el volumen total de escorrentía será real para eventos de lluvia de corta duración y bajas intensidades (Andrés, y otros, 2014); la reducción de volumen de agua por medio de la evapotranspiración será, además, mayor en épocas cálidas. En eventos excepcionales de lluvia, solamente se podrá retardar la liberación de la cantidad de agua que ha podido ser almacenada y prácticamente ninguna cantidad de agua podrá ser evapotranspirada. El potencial de almacenamiento, previo a un evento de precipitación, dependerá altamente del grado de humedad antecedente, por lo que largos periodos de lluvia reducen progresivamente el buen funcionamiento del LID.

A mayor cobertura vegetal y mayor espesor del sustrato, mayor será el aislamiento térmico, ya que son las propias capas que conforman el tejado, junto con la sombra que aporta la vegetación, las que crean el efecto aislante. Por otro lado, aunque se tiende a pensar que un mayor espesor del sustrato permitirá una mayor retención del agua de precipitación, estudios demuestran que la diferencia entre capas de sustrato finas y gruesas no es significativa (Dietz, 2007).

Los tejados verdes se recomiendan siempre para edificios de nueva construcción, pero pueden resultar muy útiles en rehabilitación de antiguos tejados. En el segundo caso, se deberá prestar especial atención a la resistencia estructural del edificio, ya que no fue diseñado para soportar la sobrecarga que supone un tejado verde. Esta sobrecarga vendrá dada en función del espesor de



la capa de sustrato y del tipo de cobertura vegetal; Andrés y otros (2014) enmarcan las sobrecargas entre 0,5 y 1 KN/m<sup>2</sup> para tejados extensivos saturados. Los tejados verdes suelen implementarse en cubiertas planas pero pueden utilizarse en cubiertas inclinadas hasta 20° con éxito. La inclinación de la cubierta supone reducir la capacidad de almacenamiento.



Figura 21: Tejado verde en la sede de la “British Horse Society”. Fuente: Wikipedia.

### 3.5.2.2. Sistemas de infiltración

#### Descripción general

Esta categoría de sistemas LID engloba una serie de elementos de drenaje urbano sostenible con el principal objetivo de favorecer la infiltración de la escorrentía urbana. Los principales y más comunes sistemas de infiltración son los pozos, zanjas y depósitos de infiltración. Todos ellos son excavaciones en el terreno posteriormente rellenas de un material con alto porcentaje de huecos que permite el almacenamiento de escorrentía proveniente de superficies impermeables, mientras esta va percolando a través del medio circundante.

Los pozos de infiltración (o “Infiltration soakaways”) conforman pequeños volúmenes de retención, frecuentemente contruidos en propiedades privadas, bajo jardines. Estos almacenan temporalmente la escorrentía proveniente normalmente de tejados. Existen varios tipos de pozos de infiltración; entre ellos existen los pequeños pozos contruidos con elementos modulares o materiales granulares envueltos de geotextil y los más voluminosos, prefabricados de hormigón perforado, rodeados de relleno granular. Estos últimos pueden disponer de pozos de inspección y mantenimiento.

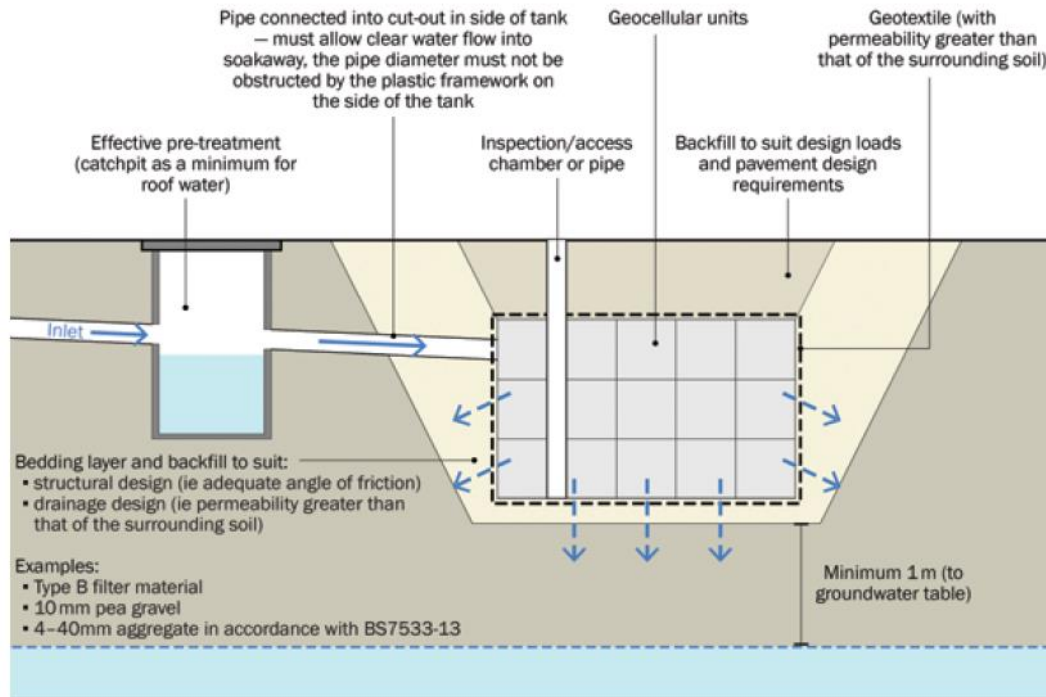


Figura 22: Sección de un pozo de infiltración a base de elementos modulares. Fuente: “The SuDS manual” de CIRIA.

Las zanjas de infiltración (o “infiltration trenches”) son pozos de infiltración en disposición lineal. La ventaja que ofrecen respecto a los pozos es que pueden ser menos profundos, más estrechos y estar abiertos a la superficie. Además pueden repartir su área en planta sobre diferentes tipos suelos, mientras que el pozo puede recaer por completo sobre un material poco filtrante. Cuando las zanjas filtrantes tienen el objetivo de transportar la escorrentía hacia otros sistemas de tratamiento mayor o al medio receptor directamente se denominan habitualmente drenes filtrantes; estas pueden incluir una tubería perforada embebida en el material poroso para facilitar la circulación del agua.

Los depósitos o estanques de infiltración (“infiltration basins”) son depresiones en el terreno diseñados para almacenar el agua de lluvia en superficie mientras permiten que esta vaya infiltrando en el terreno. Suelen estar cubiertos de vegetación y captan la escorrentía de las superficies impermeables adyacentes. Se podría definir como una balsa de laminación que permite la infiltración a través de su base y laterales. Se está popularizando últimamente su uso en glorietas.

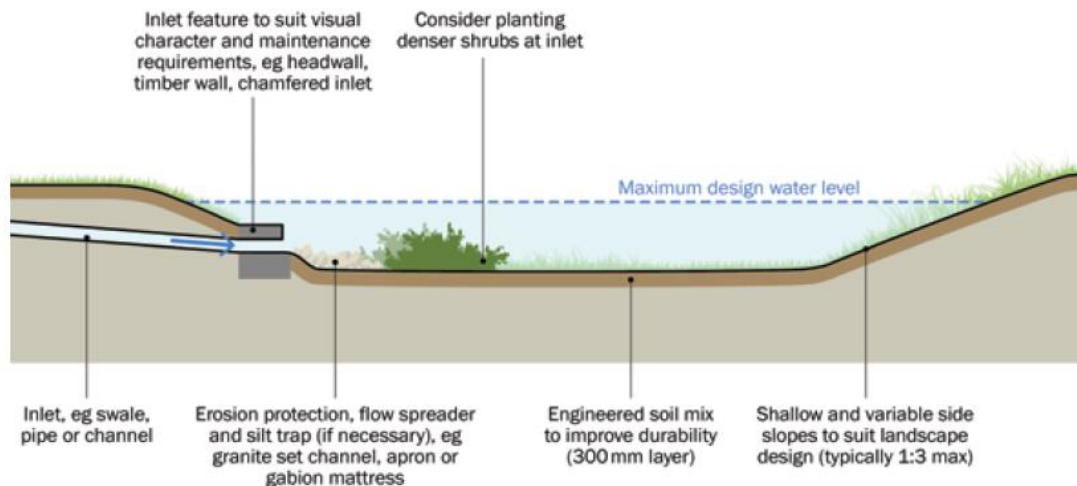


Figura 23: Sección de un depósito de infiltración. Fuente: “The SuDS manual” de CIRIA.

### Criterios de diseño

El buen funcionamiento de los sistemas de infiltración es totalmente dependiente de la permeabilidad del terreno existente, ya que si la capacidad de infiltración es mucho menor a la intensidad de lluvia, el LID se verá rápidamente colapsado. Este tipo de LID es efectivo tanto en términos de atenuación como de infiltración, por lo que contribuirán a recuperar los volúmenes de agua subterránea y a mejorar su calidad. Es importante, también, mantener una cierta distancia entre el nivel freático y la base del sistema de infiltración, ya que si el agua subterránea entra en el volumen destinado al almacenamiento, se le resta capacidad para retener escorrentía.

Debe procurarse que el fondo del sistema sea lo más plano posible para asegurar una acumulación e infiltración uniforme en toda la superficie en planta del LID. Cuando los sistemas de infiltración sean a cielo abierto debe analizarse con cuidado el nivel alcanzable de la lámina de agua para que no sobrepase la elevación del terreno adyacente.

Los sistemas de infiltración se utilizan habitualmente para recolectar la escorrentía generada en pequeñas áreas como tejados, patios privados, zonas de parking, etc., bien por superficie o por tubería (como sería el caso de los tejados). Una de las principales ventajas que aportan es que, en el caso de pozos y zanjas de infiltración, pueden ser enterrados y adaptarse a cualquier ubicación sin ocupar superficie ni afectar al paisaje. Esto puede resultar muy favorable en zonas con desarrollo urbanístico denso. Se debe tener especial cuidado cuando se utilicen para drenar áreas cuya superficie es susceptible de ser erosionada por posibles problemas de colmatación y bloqueo.

Es preciso también prestar atención al posible caudal de exceso, generado por la incapacidad del sistema de infiltración de almacenar un evento de lluvia que exceda la capacidad de diseño del LID. Una posible solución es la de situar un aliviadero por encima del nivel de agua almacenada de diseño y descargar el agua excedente aguas abajo. También es posible almacenar este caudal para su aprovechamiento.



Figura 24: Construcción de una gran zanja de infiltración a base de grava gruesa. Fuente: Enviro-utilities, INC.

### 3.5.2.3. *Sistemas de bio-retención*

#### Descripción general

Los sistemas de bio-retención son sistemas multicapa que se sitúan habitualmente en zonas en ligera depresión y permiten el almacenamiento, infiltración y la eliminación de contaminantes a través del uso de suelos y vegetación. Además, a diferencia de los sistemas de infiltración, proveen de una estética atractiva, hábitat, biodiversidad y enfriamiento del microclima local.

Son altamente flexibles y versátiles en el sentido de que pueden adaptarse a una gran variedad de paisajes urbanos (zonas comerciales, parkings, aceras, parques, etc.). Se pueden utilizar multitud de combinaciones de materiales, formas y dimensiones para adaptarlos a las circunstancias de la cuenca. El diseño más habitual consiste en rellenar una excavación superficial con las siguientes capas, en orden ascendente:

- Geotextil: Separa la capa drenante, tanto del terreno circundante como de la capa de sustrato, e impedirá la contaminación de los huecos del material poroso con finos. Puede ser substituido por un material de transición.
- Capa drenante: Compuesta de grava u otro material poroso con la finalidad de almacenar el agua interceptada. De esta manera se permite la infiltración del agua de lluvia hacia el terreno. Si se necesita volumen de almacenamiento adicional también se pueden colocar, en esta capa, elementos modulares.
- Tuberías perforadas: Recolectan el agua almacenada en la capa drenante y la vierten al sistema de alcantarillado. Son opcionales y solamente se incluirá en el caso de que la capacidad de infiltración del suelo circundante no sea suficiente para la lluvia de diseño.
- Sustrato: Capa de suelo de tipo arenoso que permite el crecimiento de vegetación. El tipo de material escogido deberá ser razonablemente permeable, resistente al calor, congelación y retracción y aceptable en términos de contenido de nutrientes. Es esta capa la que controla el ritmo de infiltración al sistema y, por lo tanto, su eficiencia.



También será donde la mayor parte de contaminantes sea retenida. Su profundidad puede variar entre 400 y 1000 mm.

- Vegetación

El suelo nativo se encontrará bajo la capa drenante y deberá disponer de la conductividad hidráulica suficiente para que infiltre el agua acumulada antes de 48 horas después del evento de lluvia (Sun, Wei, & Pomeroy, 2011).

Una variante de los sistemas de bio-retención es el jardín de lluvia o “rain garden”. Estos son normalmente de dimensiones reducidas y se utilizan en la propiedad privada. Su diseño no es tan preciso y las capas drenante y de geotextil son reemplazadas por una fina capa de suelos arenosos o simplemente eliminadas. El principio de funcionamiento es equivalente a los sistemas de bio-retención convencionales, pero los beneficios en términos de infiltración y atenuación de la escorrentía serán mucho menores. El atractivo de estos es que ofrecen diseños creativos a los jardines particulares a la vez que colaboran, en la medida en que son capaces, a la gestión del agua de lluvia.

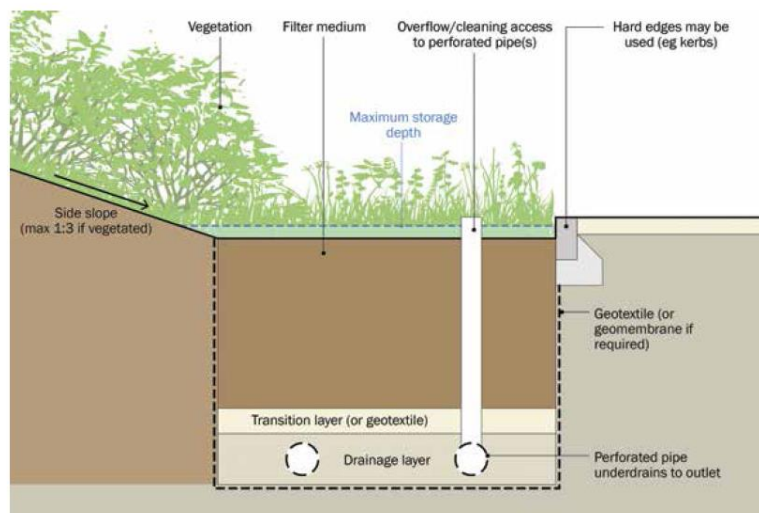


Figura 25: Sección de un sistema de bio-retención. Fuente: “The SuDS manual” de CIRIA.

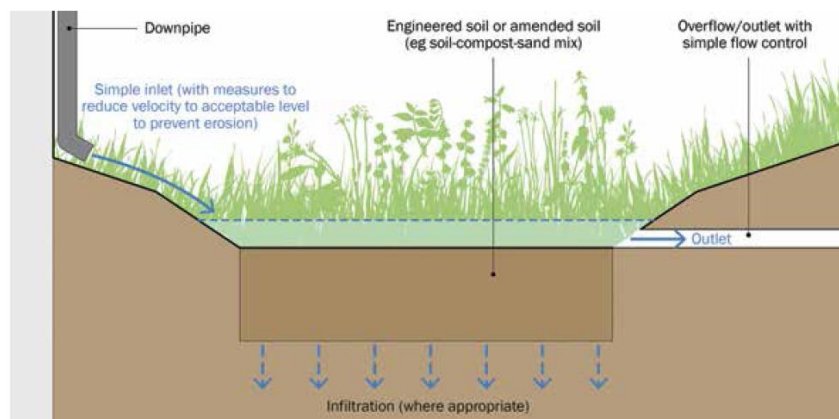


Figura 26: Sección de un jardín de lluvia. Fuente: “TheSuDS manual” de CIRIA.

### Criterios de diseño

El agua de lluvia que recolecta el sistema de bio-retención se acumula en superficie mientras se va filtrando a través del sustrato. En el caso de que la intensidad de lluvia sea tan alta que el agua cae más rápido de lo que infiltra, se permitirá que se almacene en superficie hasta cierta altura; esta vendrá determinada por una berma de construcción (de entre 150 y 300 mm de altura) o por los taludes laterales de la propia excavación (en el caso de disponer de más espacio en superficie). Se demuestra que la inclusión de la berma incrementa en gran medida la infiltración (Hunt, Passeport, & Brown, 2008). Por lo tanto, los sistemas de bio-retención son capaces de reducir la escorrentía por medio de la infiltración en el medio y al mismo tiempo por evapotranspiración a través de la vegetación en superficie. Las labores de atenuación del pico del hidrograma de salida las realizan la capa drenante y la berma. Por razones obvias, en caso de eventos extremos que ocasionen acumulación en superficie, la evapotranspiración no se dará.

Como es habitual con la mayoría de las técnicas LID de tratamiento en origen, el principal impedimento a la utilización de sistemas de bio-retención es la disposición de espacio en superficie, en la cuenca urbana, para construirlos. Además, si estos se deben hacer cargo del drenaje completo de la cuenca, deberán ser diseñados para drenar áreas menores a 0,8 ha (Davis, 2008).

Debe procurarse que la superficie del LID sea lo más plana posible para una distribución uniforme del agua acumulada. Por ello su implantación en cuencas con grandes pendientes será dificultosa. El nivel freático debe mantenerse cierta distancia por debajo de la capa drenante por motivos análogos a los comentados para los sistemas de infiltración.



Figura 27: Ejemplo de sistema de bio-retención. Fuente: US Environmental Protection Agency.



### 3.5.2.4. Pavimentos permeables

#### Descripción general

Los pavimentos permeables constituyen una línea de investigación muy particular dentro de las técnicas LID; pretenden convertirse en una alternativa sostenible a las calzadas y aceras convencionales. Estos proporcionan una superficie de rodadura para los vehículos y de tránsito para los transeúntes, al mismo tiempo que permiten el paso vertical del agua de lluvia a través de ellos. Para que esto sea posible disponen de una capa superficial de pavimento permeable, que lleva siendo objeto de estudio desde los años 1970. Una vez el agua ha traspasado esta capa, el agua continua infiltrándose a través de una serie de capas inferiores, equivalentes a las que se utilizan para los sistemas de bio-retención; una capa de substrato arenoso y una capa drenante previas al terreno natural. Por lo tanto, los pavimentos permeables suponen una técnica LID de gestión en origen que intercepta, retiene e infiltra la escorrentía para atenuar el pico del hidrograma de salida y reducir el volumen total de escorrentía.

Existen dos técnicas diferenciadas para obtener un pavimento permeable:

- Pavimentos porosos: Infiltran el agua a través de la totalidad del material en superficie.
- Pavimentos permeables: Su superficie está formada por un material impermeable pero se dejan espacios entre los bloques de material para permitir el paso del agua.

Dentro de cada una de estas dos técnicas existen múltiples tipologías de pavimentos permeables, en función de los materiales utilizados en su construcción. Algunas de ellas son las siguientes:

- Pavimentos permeables modulares: Consisten en empedrar la superficie con bloques de hormigón, arcillas, roca natural, etc., dejando amplias juntas entre ellos, rellenas de material granular, para permitir el paso del agua a las capas inferiores. Su uso se extiende a zonas peatonales, caminos, zonas de aparcamiento, puertos, etc.
- Asfalto poroso: Se trata de un tipo de asfalto que aumenta su relación de poros eliminando la porción de finos de la mezcla. Es tan poroso que permite el paso del agua a través de él, manteniendo al mismo tiempo cierta resistencia. Este, además, reduce el ruido del tráfico. Se puede utilizar en zonas de aparcamiento, caminos, carreteras de tráfico ligero, parques, escuelas, etc.
- Césped reforzado: Se utilizan mallas de hormigón o polímeros rellenas de substrato sembrado con césped o simplemente de grava. Su diferencia con respecto a los pavimentos modulares es que la proporción de área permeable es mayor. Su uso se limita a zonas de parking, escuelas, caminos, etc. Es importante que se diseñe de manera que los suelos que lo componen no se compacten.
- Grava fijada con resina: Se utiliza en zonas de tráfico ligero, escuelas, caminos, etc. y resulta atractivo a la vista.
- Hormigón poroso: Se trata de un tipo de hormigón que, al omitir las arenas más finas de la mezcla, consigue que su relación de poros sea tan elevada que permite el paso del agua a través de él, manteniendo al mismo tiempo cierta resistencia. Se utiliza en zonas de parking y de tráfico ligero.

- Pavimento de bloques porosos: Se trata de un tipo de pavimento permeable modular que tiene la peculiaridad de que los bloques están hechos de hormigón poroso. Estos priorizan la infiltración a través del propio hormigón antes que por las juntas. La experiencia demuestra que son altamente susceptibles de sufrir colmatación, luego su uso es más limitado.

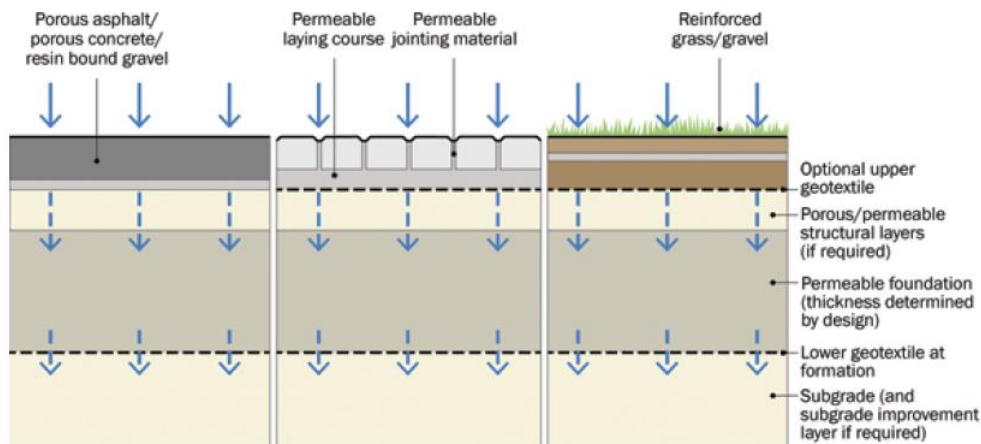


Figura 28: Esquema en sección de tres tipos diferentes de pavimento permeable. Fuente: “The SuDS manual” de CIRIA.

Los pavimentos permeables tienen la opción, al igual que los sistemas de bio-retención, de disponer de tuberías perforadas en la capa drenante con el objetivo de evacuar los excedentes de agua que no es capaz de infiltrar el terreno natural. En este caso, esta medida responde también a un aspecto de seguridad, ya que una subida excesiva del nivel del agua hacia las capas superiores puede poner en riesgo la capacidad estructural del firme. Además, la acumulación de agua en superficie no es, en este caso, algo deseable. Existe incluso la opción de impedir completamente la infiltración en el caso de que el suelo circundante sea muy poco permeable o muy poco resistente, o si el nivel freático es muy elevado. Por otro lado, se demuestra (Dietz, 2007) que ante un terreno poco permeable, basta con disponer de una capa drenante más gruesa para mantener el nivel de beneficios obtenidos.

Otra opción interesante que ofrecen los pavimentos permeables son los sistemas híbridos entre pavimentos permeables y convencionales, que hacen más factible la rehabilitación de los pavimentos ya existentes en los núcleos urbanos.

### Criterios de diseño

Por lo tanto, el sistema de gestión de la escorrentía que utilizan los pavimentos permeables es prácticamente análogo al de los sistemas de bio-retención, con la peculiaridad y ventaja de que estos pueden ser implementados en una superficie mucho mayor de la cuenca urbana. Si se substituyen las calzadas y aceras convencionales por pavimentos permeables se aumenta considerablemente la interceptación de agua pluvial in-situ y es mucho más probable su infiltración. Aun así, la conductividad hidráulica de la capa de pavimento deberá siempre ser considerablemente mayor a la intensidad de la lluvia de diseño para evitar la acumulación de

agua en superficie (un valor mínimo de 2500 mm/h se considera aceptable para ser considerada permeable). Es habitual que la permeabilidad del firme sea muy elevada, pero no se debe confiar excesivamente, ya que los problemas más habituales con firmes permeables aparecen, a lo largo del tiempo, relacionados a la colmatación de los poros del pavimento. La colmatación se produce en los 2 cm superiores de la capa (Dietz, 2007), luego con sencillas labores de mantenimiento constantes se puede mantener una capacidad de infiltración muy aceptable (Sañudo-Fontaneda, Rodríguez-Hernández, Vega-Zamanillo, & Castro-Fresno, 2013). El efecto de la colmatación en la permeabilidad de los pavimentos permeables se estudia en profundidad en Borgwardt (2006). Por otro lado, la permeabilidad de las capas inferiores será, en muchas ocasiones, menor a la del pavimento, luego cabe pensar que serán estas las limitantes para un mejor o peor funcionamiento del conjunto a la hora de permitir la infiltración al terreno natural (de manera análoga a como sucede con los sistemas de bioretención).

Los pavimentos permeables son, a priori, una técnica LID de tratamiento en origen, pero se puede aprovechar la capacidad de almacenamiento que ofrecen estos para retener la escorrentía generada en otras superficies impermeables, tales como tejados u otros pavimentos adyacentes. Si se lleva a cabo esta alternativa, la colmatación de los materiales porosos se producirá antes.

La elección adecuada del tipo de pavimento permeable a utilizar es crucial para un buen funcionamiento de este. La decisión se tomará principalmente en función de las cargas de tráfico que el pavimento vaya a soportar. Por ejemplo, es posible el uso de elementos modulares como capa drenante para obtener mayor capacidad de almacenamiento, pero un estudio exhaustivo de su capacidad resistente deberá ser llevado a cabo, ya que su bajo módulo elástico y las juntas entre módulos pueden resultar críticos para el correcto funcionamiento del firme. Aunque, por supuesto, los efectos que provoca en la capacidad estructural del firme el hecho de que existan capas de suelo saturadas bajo la capa de rodadura del pavimento, deben ser cuidadosamente estudiados. El uso de cualquier tipo de pavimento permeable debe quedar excluido en zonas industriales contaminadas, carreteras de alta intensidad de tráfico pesado, zonas de gran aporte de sedimentos y zonas en gran pendiente (Andrés, y otros, 2014).

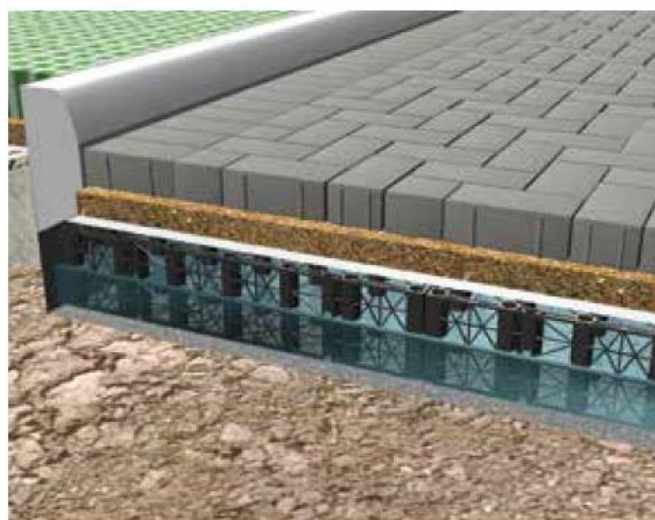


Figura 29: Representación en 3D de un posible pavimento permeable a base de bloques de hormigón, material granular, geotextil y elementos modulares. Fuente: “The SuDS manual” de CIRIA.

En definitiva, la función de los pavimentos permeables es doble; ser capaces de captar, retener e infiltrar el agua de lluvia de la tormenta de diseño y proporcionar una resistencia estructural suficiente para resistir las cargas a las que se verá solicitado. Por lo tanto, un análisis estructural e hidráulico, en conjunto, deberá llevarse a cabo en detalle para determinar el material y grosor de las capas a implementar.



Figura 30: Pavimento de césped reforzado en el Passeig de Sant Joan en Barcelona. Fuente: Lola Domènech Arquitectura.

#### 3.5.2.5. Cunetas verdes

##### Descripción general

Las cunetas verdes son simplemente cunetas sin revestir, cubiertas de vegetación; excavadas en el terreno. De esta manera permiten la infiltración a través de su base y paredes mientras transportan la escorrentía de un punto a otro. Son, por lo tanto, canales naturalizados poco profundos a cielo abierto que cumplen una función de reducción, atenuación y tratamiento de la escorrentía. Se utilizan principalmente para recolectar la escorrentía generada en un pavimento adyacente y por ello su aplicación más intuitiva es la de substitución de las cunetas revestidas de hormigón en carreteras y autopistas. En ambientes urbanos son de más difícil aplicación por la falta de espacio para canalizar la escorrentía en superficie, aunque se pueden utilizar en algunas zonas de aparcamiento, residenciales o de travesía (Rodríguez, Rodríguez, Gómez-Ullate, & Castro, 2006). Las cunetas verdes suelen ser anchas y poco profundas aunque admiten múltiples formas y tipos de vegetación. Se pueden dividir en dos sub-tipos:

- Cunetas de transporte: Es la tipología estándar de cuneta verde, que simplemente se excava y se cubre de vegetación. Son particularmente efectivas para transportar la escorrentía captada hacia otros sistemas de tratamiento mayor o a los lugares de vertido correspondientes, mientras ralentizan el flujo y permiten su infiltración.



- Cunetas secas: Son un híbrido entre cunetas verdes y zanja de infiltración. La base de la cuneta se excava y rellena de material filtrante que contiene, opcionalmente, una tubería perforada para recoger y transportar el excedente. Esta capa drenante se separa del terreno natural por medio de un geotextil. Este tipo de cuneta permite un mayor almacenamiento de escorrentía y favorece en mayor medida la infiltración.

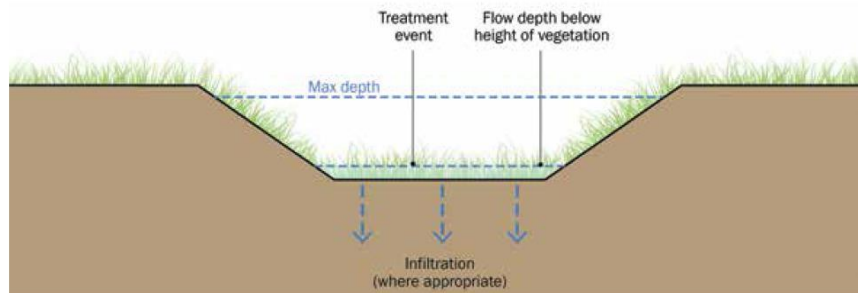


Figura 31: Sección de una cuneta de transporte. Fuente: “The SuDS manual” de CIRIA.

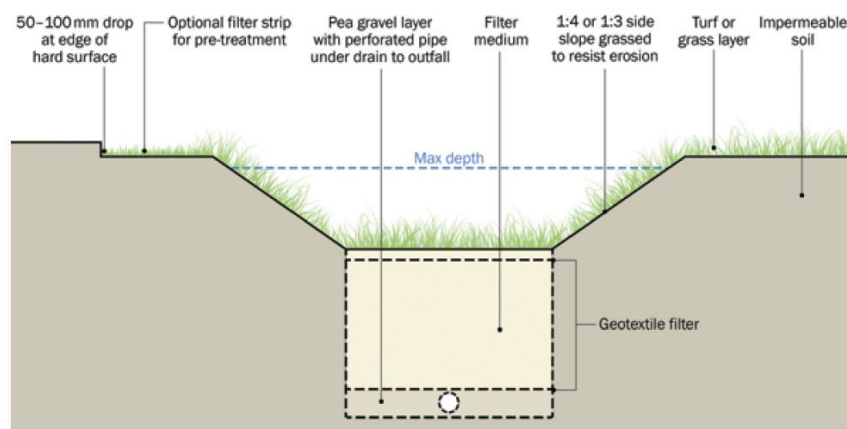


Figura 32: Sección de una cuneta seca. Fuente: “The SuDS manual” de CIRIA.

### Criterios de diseño

Acostumbran a utilizarse cunetas anormalmente anchas para este propósito, pero cunetas de tamaños más convencionales son también posibles. Los taludes laterales suelen ser notablemente planos para permitir una mejor infiltración a través de estos. Se debe realizar el cálculo hidráulico de canales abiertos que corresponda, para que el agua circule con una velocidad adecuada, sin que se produzca erosión de material ni que se estanque el agua. En ocasiones se incorporan pequeñas presas a lo largo de su recorrido para permitir la acumulación de agua y favorecer el efecto atenuador de la escorrentía.

Las cunetas verdes aportan grandes beneficios en términos de reducción de escorrentía para eventos de lluvia poco intensos; normalmente no producirán ningún caudal resultante ya que

será todo eliminado por medio de infiltración y evapotranspiración, siempre y cuando el terreno no sea altamente impermeable. Para tormentas de gran periodo de retorno, las cunetas aportarán poca ayuda en cuanto a reducción de volumen de escorrentía, pero si por lo que respecta a la atenuación del pico de caudal ya que, al fin y al cabo, todo el volumen de agua que admite la cuneta será retenido cierto tiempo.

Las cunetas verdes, especialmente las cunetas secas, tienen una gran capacidad de tratamiento de contaminantes y, al mismo tiempo, proporcionan un hábitat para la vida salvaje y vegetación autóctonas. No obstante, será de vital importancia un constante mantenimiento para evitar la acumulación de residuos que obstruyan el flujo del agua y asegurar que la vegetación se encuentra en buen estado.



Figura 33: Ejemplo de cuneta verde. Fuente: wordpress.

### 3.5.2.6. *Sistemas de almacenamiento*

#### Descripción general

Se trata habitualmente de tanques o depósitos que recolectan el agua de lluvia caída en superficies impermeables como tejados y la almacenan para darle un posterior uso. Es un método de reciclaje del agua de lluvia que colabora para solventar los problemas de demanda de agua de las ciudades y, al mismo tiempo, para reducir la escorrentía que circula por las calles. Los usos que se le puede dar al agua almacenada van desde aplicaciones domésticas como el riego, cisternas de baño y limpieza, hasta aplicaciones comerciales o industriales. Para algunos de los usos el agua deberá ser sometida a un proceso de pretratamiento. De momento, su uso para la producción de agua potable no es habitual ni recomendable.

Los elementos necesarios para disponer de un sistema de almacenamiento son principalmente el depósito y el sistema de tuberías necesario para la captación y transporte de la escorrentía hacia este. En algunos casos, en los que la aplicación que se le va a dar al agua recolectada lo requiera, será necesario además un sistema de bombeo.



El sistema de almacenamiento más popular es el conocido como “rain barrel”. Se trata de un barril de dimensiones relativamente reducidas que capta el agua de lluvia caída sobre un edificio.

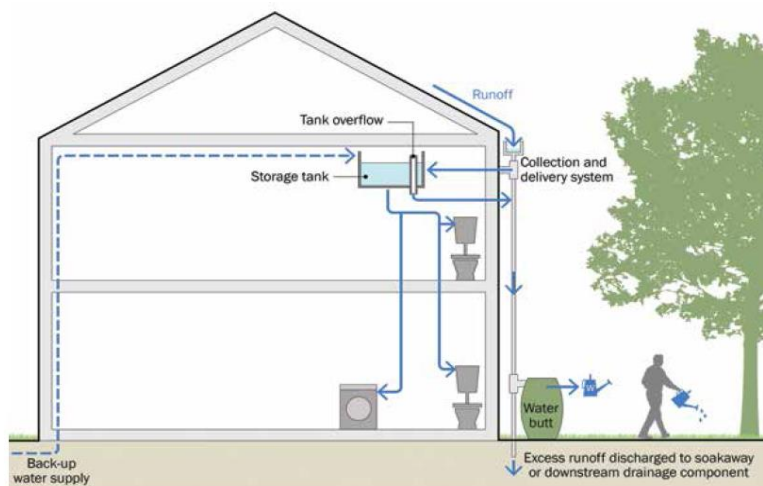


Figura 34: Esquema de un sistema de almacenamiento y aprovechamiento doméstico sin bombeo. Fuente: “The SuDS manual” de CIRIA.

### Criterios de diseño

Si el uso que se le va a dar al sistema se limita al consumo doméstico, el tamaño del depósito será el necesario para almacenar el volumen de agua que permita cubrir los requerimientos del edificio. En este caso, no se puede contar con el efecto que puedan tener estos sistemas en la gestión de la escorrentía urbana para eventos de lluvia importantes.

Por otro lado, los sistemas de almacenamiento pueden utilizarse para colaborar en la gestión sostenible del agua de lluvia en las ciudades. Para cumplir ese objetivo, los tanques instalados serán dimensionados para captar una cantidad específica de agua durante un evento de lluvia. Si la función del sistema es exclusivamente la atenuación del pico de caudal de escorrentía, se puede disponer un tanque que almacene el mayor volumen de agua posible durante la tormenta y que lo libere un tiempo después de que haya terminado, cuando la red de colectores ya no esté tan colapsada. Si se quiere, además, reducir el volumen de escorrentía, se puede liberar el caudal en alguna zona permeable cercana.

Aunque puede parecer una técnica cuya eficiencia es, cuanto menos, reducida a escala de ciudad, (Hager, 2003) teoriza que, si cada casa dispone de al menos dos “rain barrels” con una capacidad mínima de  $1\text{m}^3$ , se es capaz de capturar la escorrentía de 5 años de periodo de retorno que se genera en un tejado.

Dado que este tipo de técnica LID será habitualmente utilizada en domicilios particulares, resulta complicado dimensionar la capacidad de retención en función de la climatología local.

En ocasiones se incluyen técnicas de retención como tipología de LID. En este trabajo no se van a considerar así ya que depósitos de retención y balsas de laminación ya se han comentado en capítulos anteriores como técnicas de drenaje urbano previas, de índole más convencional, dentro del drenaje urbano. También se puede encontrar la catalogación de los vertidos de las bajantes de los tejados hacia zonas permeables como técnica LID estructural pero, en este trabajo, se ha considerado como no estructural.

### 3.6. Implantación alrededor del mundo y en España

Las técnicas LID de drenaje urbano sostenible, a pesar de parecer un reciente cambio de enfoque de la gestión del agua de lluvia, llevan siendo estudiadas e investigadas desde hace varias décadas. Han ido, progresivamente, adquiriendo popularidad y captando la atención de más estudiosos de la materia a medida que se obtenían resultados positivos y se ampliaba el abanico de posibilidades que estos ofrecían. A día de hoy, proyectos que incluyen técnicas LID son una realidad en multitud de países, con buenos resultados. En España, como en otros países del sur de Europa, no se contempla la nueva corriente del drenaje urbano sostenible como un aporte diferenciador en la hidrología urbana; se entiende, más bien, como un complemento estético con mejores intenciones que capacidades. Pero este escepticismo se fundamenta en las diferentes circunstancias y condicionantes locales que hacen que la aplicación de los LID en España, más concretamente en el litoral mediterráneo, no pueda utilizar como argumento experiencias positivas en el extranjero.

#### 3.6.1. Aplicación alrededor del mundo

En un buen número de países del mundo, y en aumento año tras año, el uso de técnicas LID está ya notablemente extendido y se elaboran manuales de diseño, recomendaciones, normativa, legislación y documentación de todo tipo. Además, existe un grado de concienciación ciudadana envidiable y la divulgación y promoción de los beneficios de un drenaje urbano sostenible están a la orden del día. Estos son países como Australia, Estados Unidos, Japón, Reino Unido, Alemania, Holanda, Francia, Sudáfrica, Nueva Zelanda, etc.

El primer caso a destacar es el estadounidense, por su precocidad tanto intelectual en el concepto como proactiva a la hora de darle un marco normativo. Ya por los años 1970 se detectó un problema con la contaminación difusa que arrastraba la escorrentía urbana hacia el medio, y fue en 1972 cuando se llevó a cabo la primera investigación sobre superficies permeables. Esta preocupación se reflejó en el “Clean Water Act” que derivó en programas específicos de actuación para resolver el problema (Perales & Andrés-Doménech, 2007). Ya a partir de 1990 la Agencia de Protección Medioambiental estadounidense (EPA) impulsó la “Phase I stormwater rule” que exigía a las ciudades de más de 100.000 habitantes permisos para el vertido de aguas pluviales al medio natural; a partir de 1999 también se haría efectivo para pequeña áreas urbanas. Para obtener los permisos es necesaria la elaboración de un Plan de Gestión de Pluviales que incluya técnicas BMPs (LIDs) (Nisenson, 2006). La Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE) ha investigado, estudiado y elaborado manuales durante años acerca de técnicas LID para la reducción y tratamiento de la escorrentía. Durante

los años siguientes, los gobiernos estatales y locales han seguido legislando y diferentes instituciones han seguido investigando para seguir promoviendo el uso de LIDs.

Portland es un claro ejemplo de ciudad pionera en sostenibilidad y un ejemplo en planificación de actuaciones. Dispone de un programa que, desde 1990, ha conseguido una red separativa para las aguas pluviales, la autorización de los vertidos de acuerdo con la regulación del estado, la implantación de diferentes técnicas LID monitorizadas para controlar su viabilidad y eficiencia, la desconexión de las bajantes de los edificios de la red unitaria, el examen constante de prácticas en la ciudad para comprobar que se cumplían las normativas, etc. En Seattle, por otro lado, se llevó a cabo un proyecto piloto de implantación de LIDs (tejados verdes y pavimentos porosos entre otros) que consiguió reducir un 25% las emisiones de contaminantes a las aguas receptoras, así como retener cerca de un 37% más de volumen de escorrentía del que se retenía anteriormente (Poletto, 2011).

Tampoco es desdeñable el ejemplo australiano. El del área metropolitana de Melbourne se considera, normalmente, un ejemplo del proceso de cambio en la gestión del agua de lluvia pionero en el mundo. Brown y Clarke (2007) comentan detenidamente las cuatro fases de este proceso. A día de hoy, en Melbourne, es obligatorio gestionar el agua de lluvia mediante LIDs en nuevos desarrollos residenciales; en los proyectos industriales o comerciales, así como en los de rehabilitación, aún no. En Sydney, por otro lado, se crearon “The WSUD Technical Guidelines for Western Sydney”; estas dan directrices y especificaciones de diseño de técnicas LID para su uso en el oeste de Sydney, que ha convertido recientemente el uso del suelo periurbano y rural a uso residencial.

Por lo que respecta a Europa, el uso de técnicas LID está claramente más extendido en los países del centro y norte del continente que en los del sur (España, Italia, Grecia, Portugal, etc.). En Reino Unido, por ejemplo, se presentó el borrador de proyecto de ley “Flood and Water Management Bill”, con el que el gobierno pretende estar preparado ante eventos de inundación y asegurar una gestión sostenible de los recursos hídricos (Febles, Perales, & Soto, 2009). Además, se trata de un estado con una amplia tradición en el estudio de LID, basándose en los objetivos marcados por la Agenda 21 en relación a la gestión del agua pluvial. En esta línea se han aglutinado en Reino Unido multitud de empresas, universidades y grupos de expertos y profesionales especializados en drenaje sostenible. Todo ello desemboca en las guías y manuales como el de CIRIA, que lleva más de 10 años en constante actualización. En Escocia, por ejemplo, según la SEPA (“Scotland and Northern Ireland Forum for Environmental Research”) el uso de LIDs es ya una práctica común en más de 700 localidades, con aproximadamente 4000 sistemas implantados.

También en países como Francia o Alemania el uso de pavimentos porosos lleva siendo una realidad desde los años 1970 y se lleva investigando la implantación de SUDs en profundidad desde los 1980-90. En Bourdeaux, de hecho, desde 1978 son de obligada aplicación. En Francia son más populares medidas para el control de inundaciones como balsas de retención, por la creciente preocupación en el asunto, mientras que en Alemania son más utilizadas técnicas como zanjas y cunetas de infiltración en zonas muy impermeables o con un terreno natural con dificultades para la infiltración. En Suecia y Dinamarca diferentes técnicas de retención son comunes, así como las balsas de infiltración, que ayudan en el control los caudales originados por el derretimiento de la nieve (Revitt, Ellis, & L., 2003).

### 3.6.2. Aplicación en España

En los países del sur de Europa como España, Italia, Portugal o Grecia, el uso de técnicas LID es limitado. Sin embargo, cabe destacar el interés creciente a lo largo de la última década y la concienciación por los problemas que genera una gestión del agua pluvial deficiente. La mayoría de detractores de los métodos de drenaje urbano sostenible, en España, coinciden en que el motivo de su escaso éxito reside en las diferencias pluviométricas del clima mediterráneo con respecto al atlántico nord-europeo. Las zonas donde los LID han triunfado y demuestran ser una seria alternativa al drenaje convencional gozan de lluvias de larga duración y poca intensidad, mientras que las lluvias problemáticas en el mediterráneo son de carácter torrencial (de corta duración y elevada intensidad). Las condiciones mediterráneas no son, desde luego, las más indicadas para que la mayoría de técnicas LID ofrezcan un máximo rendimiento. Aun a pesar del escepticismo general, ante los posibles beneficios del uso de LIDs en España, su estudio se está promoviendo y empiezan a aparecer en algunos planes de drenaje. La tendencia está marcada, pero la tradición de resolver durante siglos el drenaje urbano con colectores enterrados está muy arraigada en la ingeniería española.

#### 3.6.2.1. Investigación

En lo que respecta al ámbito de la investigación cabe destacar la labor realizada por el grupo de investigadores de la Universidad de Cantabria, introductores de la tecnología LID en España. En 1993, el grupo de Ingeniería Ambiental (GIA) comienza el estudio de técnicas de drenaje pluvial urbano alternativo. Años después, los esfuerzos por traer los LID a España se concentran en el grupo de investigadores GITECO. Entre sus logros se encuentra el primer manual de construcción de pavimentos permeables biodegradantes de hidrocarburos, que pretende generalizar su uso para atacar la contaminación difusa en las ciudades. También destaca la creación, en 2008, de la Red SUDS con el objetivo de acercar el conocimiento LID a la sociedad y establecer una red de contacto y colaboración entre expertos, universidades, instituciones y empresas. Además, GITECO ha creado el laboratorio SUDSlab que se encarga de monitorizar y estudiar el funcionamiento de los LID que han construido; algunos ejemplos son el Parque de Las Llamas, donde implantaron un humedal artificial y un aparcamiento experimental con distintos tipos de pavimento permeable, los aparcamientos experimentales de La Guía en Gijón y el del Parque Científico y Tecnológico de Gijón. La Universidad de Cantabria se ha establecido como el motor de la investigación en drenaje urbano sostenible y promotora de su difusión. Colaboran, a día de hoy, con otras instituciones investigadoras, el ámbito empresarial y administraciones en regiones de todo el país como el País Vasco, Madrid, Valencia o Cataluña.



**Figura 35: Construcción (Izquierda) y aspecto final (derecha) de los pavimentos permeables en el Parque de Las Llamas (Santander). Fuente: GITECO.**

El Área de Ingeniería Hidráulica de la Universidad de A Coruña (GEAMA) estudia los procesos de transformación lluvia-escorrentía mediante ensayos de laboratorio, instrumentación de procesos de escorrentía y modelización numérica. Se centran también en la realización de modelos 2D de escorrentía en eventos de lluvia intensos. Cabe resaltar, además, la labor en I+D+i, como el proyecto DINA-MAR, de “gestión de la recarga de acuíferos en el marco de desarrollo sostenible” que lleva a cabo el Grupo Tragsa.

#### **3.6.2.2. Marco normativo**

Las normativas que nos podemos encontrar a la hora de implementar técnicas LID en nuestro país son muy diversas; las hay tanto a escala europea, española, autonómica y municipal. Se podría decir que están jerarquizadas por este orden ya que la directiva europea sirve de base para las directivas estatales, normativas autonómicas y ordenanzas municipales, entre otros documentos. Todas ellas sirven de herramienta legal para impulsar una mejor, más eficiente y más sostenible gestión del agua en nuestras ciudades. En estos documentos se puede divisar ya el interés por un drenaje más sostenible y, en definitiva, un cambio de enfoque. Parte de la legislación y recomendación existente en los diferentes niveles es la siguiente:

- Nivel europeo:
  - Directiva del Marco del Agua (2000): Tiene como principios básicos el no deterioro y consecución del buen estado integral de las masas de agua superficial y subterránea, el enfoque combinado de la contaminación y gestión integrada del recurso, principio de plena recuperación de costes de servicios relacionados con el agua y el uso de espacios acuáticos y principio de participación pública y transparencia en las políticas del agua.
  - Directiva 2007/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2007, relativa a la evaluación del riesgo de inundación: Su objetivo es el de gestionar los riesgos que suponen las inundaciones para la salud humana y el medio ambiente, patrimonio cultural y actividad económica. Se aplica a las aguas interiores y costeras de toda la UE.
  - Directrices sobre mejores prácticas para limitar, mitigar o compensar el sellado del suelo (2012).

- Nivel estatal:
  - La Sequía en España. Directrices para minimizar su impacto. Ministerio de Medio Ambiente. 2007: Propone la captación, drenaje y gestión de aguas pluviales como una estrategia a desarrollar desde la planificación hidrológica, proponiendo redes separativas de drenaje, el uso de superficies permeables urbanas y la retención de agua mediante cisternas. Se recomienda establecer estas prácticas por normativa municipal, en todo desarrollo urbanístico de nueva implantación y promover su uso en proyectos de rehabilitación de las ya existentes. Menciona también el uso de incentivos económicos a los vecinos y empresas que adopte estas prácticas.
  - Gestión de las aguas pluviales. Implicaciones en el diseño de los sistemas de saneamiento y drenaje urbano. 2008. CEDEX: Principal manual a día de hoy en España para el drenaje urbano de aguas pluviales. Demuestra una tendencia al control de la contaminación difusa de las aguas pluviales y propone las técnicas LID como solución.
  - Real Decreto 1290/2012 por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas: Este hace referencia a que se deben plantear medidas que limiten la aportación de aguas de lluvia a los colectores. Se promueve, por lo tanto, el uso de LIDs.
  - Real Decreto 903/2010 de evaluación y gestión de riesgos de inundación.
  - Real Decreto 233/2013 por el que se regula el Plan Estatal de fomento del alquiler de viviendas, la rehabilitación edificatoria, y la regeneración y renovación urbana, 2013-2016.
- Nivel autonómico y otros:
  - Ordenanza de Gestión y uso eficiente del Agua en la Ciudad de Madrid. 2006: Se establece que en las actuaciones de urbanización debe minimizarse la proporción de pavimentos impermeables, con objeto de favorecer la infiltración, estableciendo unos mínimos de permeabilidad en los diferentes tipos de superficie.
  - Real Guía Técnica de Aprovechamiento de Agua en Cataluña (2011).
  - Guía de buenas prácticas de Planeamiento Urbanístico Sostenible. Castilla-La Mancha 2004: Hace referencia a la utilización de pavimentos permeables y las recomienda en zonas peatonales o de aparcamiento.
  - Buenas prácticas en Arquitectura y Urbanismo para Madrid. 2010.

Además, la administración municipal puede fomentar el uso de técnicas de drenaje urbano sostenible mediante la regulación de ordenanzas sobre medio ambiente, realizando control preventivo, sancionando vertidos, premiando su uso en propiedad privada, con el planeamiento urbanístico, etc.



Sin embargo, a diferencia de otros países como Francia, Alemania u Holanda, no existe una legislación en España que trate la gestión de las aguas pluviales con parámetros de Ordenación del Territorio, en el marco de una estrategia territorial de referencia. Hacerlo así garantizaría que cualquier mejora en la gestión de estas aguas repercutiera en la mejora de la sostenibilidad del modelo de desarrollo territorial. La causa es, en parte, el complicado marco de distribución de competencias existente en España; en la actualidad hay diecisiete legislaciones autonómicas en materia de urbanismo y ordenación del territorio (Soriano, 2012).

### 3.6.2.3. Casos de aplicación

Se va a centrar la atención, en este apartado, en la aplicación de técnicas LID en Barcelona como ciudad paradigmática de la problemática que se plantea en este trabajo. Barcelona se ha convertido en una de las ciudades más densamente urbanizadas de Europa por la imposición de límites geográficos (la montaña de Collserola aguas arriba, la propia costa aguas abajo y los ríos Llobregat y Besós). Su régimen pluviométrico es torrencial, al igual que en el resto de litoral mediterráneo, como ya se ha tratado en capítulos anteriores. Las pendientes elevadas en la parte alta de la ciudad y las zonas deprimidas cerca de la costa hacen que, en estas últimas se concentren los caudales de escorrentía que no se introducen a la red por déficit de capacidad de drenaje o falta de elementos de captación (Russo, Pouget, Malgrat, & J., 2011); es decir, la zonas más deprimidas de la ciudad sufren constantes eventos de inundación. El caso de Barcelona ha centrado la atención durante muchos años del drenaje urbano en Europa por su constante lucha contra las inundaciones; primero con la rehabilitación de la red de alcantarillado con ocasión de los JJOO de 1992 y más adelante con la incorporación al sistema de drenaje de los grandes depósitos de retención.

A día de hoy, las miradas están puestas en los sistemas de drenaje urbano sostenible, luego las medidas que se están llevando a cabo en Barcelona caminan en esa dirección. BAGURSA y PMEnginyeria han apostado firmemente por esta opción para impulsar el cambio de perspectiva en Barcelona. En este apartado se va a dar la visión según Febles y otros (2009) de las dos actuaciones concretas llevadas a cabo.

#### LIDs en el Barrio de Torre Baró

Se trata de un barrio de nueva creación en la parte alta de la ciudad, luego aguas arriba. Esto hace que cualquier actuación deba fomentar la captación en origen para reducir los caudales aguas abajo. El sistema se basa en captar la escorrentía in-situ y transportarla al punto más bajo de la actuación para su reaprovechamiento en tareas de riego y limpieza.

La actuación se basa en dirigir la escorrentía de los pavimentos de las calles al punto bajo de estas, donde se encuentran franjas filtrantes que captan, filtran y conducen el agua hacia una serie de depósitos subyacentes (a partir de estructuras modulares reticulares de polipropileno). Estos están conectados entre sí por tuberías de diámetro pequeño que favorecen la retención temporal del agua en los depósitos, laminando los caudales a lo largo del recorrido. Al mismo tiempo, el agua recogida de las cubiertas vierte a una serie de arquetas que conectan con los depósitos descritos.

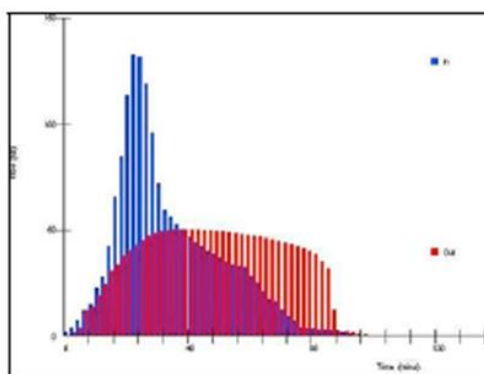


Figura 36: Simulación del efecto de laminación en uno de los depósitos. Hidrogramas de entrada y salida. Fuente: (Febles, Perales, & Soto, 2009).



Figura 37: Construcción de uno de los depósitos bajo la zanja de infiltración. Fuente: (Febles, Perales, & Soto, 2009).

### LIDs en el Barrio de La Marina de la Zona Franca. Fase de Proyecto

En Febrero de 2007 se presenta el nuevo Plan Especial de Infraestructuras del Barrio de la Marina de la Zona Franca de Barcelona (PEI). Este propone una gestión separativa de las aguas pluviales junto con la implantación de LIDs (cubiertas verdes y pavimentos permeables entre otros). El barrio se encuentra limítrofe con el área portuaria y es de pendiente muy reducida; eso lo hace muy susceptible a los efectos de las lluvias torrenciales.

Se propone dividir el ámbito de actuación en subcuencas con estructuras de captación, transporte y laminación-infiltración independientes. La escorrentía de cada una de las subcuencas sería captada mediante sistemas de bio-retención con rebose a imbornal y conducida por una red de colectores hacia depósitos de laminación-infiltración (uno por subcuenca). Por la idoneidad del subsuelo se plantearon técnicas de infiltración principalmente.

En este caso, se ha llevado acabo además un estudio comparativo de costes entre la implementación de una red unitaria y una red separativa con empleo de LIDs. Se han

considerado costes de construcción, mantenimiento y depuración de las aguas a lo largo del tiempo, observándose un importante beneficio económico a medio y largo plazo.

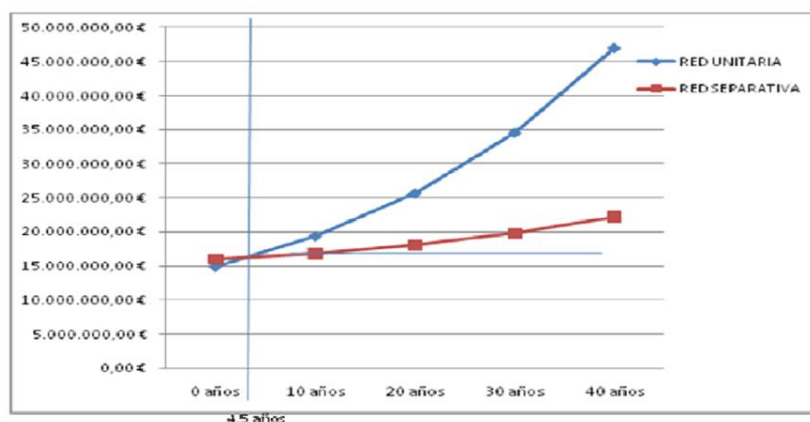


Figura 38: Comparativa de costes entre la red unitaria y la separativa no convencional (empleando LIDs). Fuente: (Febles, Perales, & Soto, 2009).

### Otras actuaciones

A parte de la iniciativa barcelonesa existen otros múltiples casos de implantación de LIDs en España, algunos más discretos que otros. Algunos ejemplos se resumen a continuación:

- Depósito de laminación-reutilización-infiltración en Villanueva de Gállego (Zaragoza): Se trata de un depósito semienterrado de laminación-infiltración con capacidad de gestionar la tormenta de diseño y evacuar las aguas pluviales de la cubierta de una gran nave industrial. Este permite solucionar los problemas de capacidad del colector existente. Otro depósito auxiliar almacena agua para su uso en riego y como agua sanitaria.
- Parque de Gomeznarro (Madrid): En este parque se substituyeron los pavimentos convencionales por pavimentos permeables y se creó un sistema de captación y transporte de aguas pluviales que conectaba varios depósitos de infiltración repartidos por el parque, de manera que se solucionaron los problemas de erosión y anegaciones.
- Parque de Cristina Enea (San Sebastián): Se instaló un sistema de captación de escorrentía mediante LIDs que solucionó los problemas de formación de charcos en las zonas deprimidas del parque.
- EXPOZARAGOZA 2007: Para la ESPOZARAGOZA se realizaron múltiples obras que incluían técnicas LID como tejados verdes, pavimentos permeables, muros vegetados y depósitos de infiltración.
- Prolongación de la Castellana (Madrid): El Plan Parcial APR.08.03 de prolongación de la Avenida Castellana contiene el anejo “Estudio de Aprovechamiento y Gestión Eficiente del Agua” en el que se incluyen recomendaciones para utilizar las técnicas LID a lo largo de los 3 Km<sup>2</sup> de prolongación de la Castellana con el objetivo de minimizar la escorrentía superficial en esta zona de nuevo desarrollo urbanístico.

- Proyecto AQUAVAL en Benaguasil y Xàtiva (Valencia): Comenzado en 2010, pretende integrar infraestructuras LID en dichos municipios y monitorizarlas. Después del buen funcionamiento demostrado suponen un gran avance en el conocimiento de las bondades del drenaje sostenible en clima mediterráneo. Por su relación con la motivación de este trabajo, esta actuación será comentada en más profundidad en el capítulo 4.

### 3.6.3. Conclusiones

Conocida la experiencia en drenaje urbano sostenible, en otros países donde el grado de conocimiento es mucho más avanzado y los esfuerzos que se están llevando a cabo en España, por parte de empresas e investigadores, para cambiar el enfoque del drenaje urbano, se extraen una serie de conclusiones:

- Legislación, normativas y ordenanzas impulsan el cambio de mentalidad.
- Se debe promover la institucionalización de la investigación e impulsar al gobierno a colaborar con los expertos.
- Es posible hacer partícipe a la ciudadanía con incentivos a la implantación de LIDs en la propiedad privada.
- Se debe promover la concienciación y educación sobre la gravedad del problema y la divulgación sobre la ciudad sostenible.
- Es importante monitorizar las actuaciones que se vayan llevando a cabo para ir creando una base de datos real y adaptada a las peculiaridades de clima y desarrollo locales.
- Es necesario profundizar en la investigación y el desarrollo, entendiéndolo como el motor del progreso, con la finalidad de producir nuestros propios manuales y guías adaptados a nuestras circunstancias.
- Aprender de las virtudes y errores de las experiencias en otros países, así como de las iniciativas llevadas a cabo en Barcelona, Santander, etc.

De esta manera quizás se pueda llegar a descubrir el modo de adaptar las técnicas utilizadas en países como Estados Unidos, Australia, Reino Unido, Alemania o Francia, que de tanto reconocimiento gozan, para que sean compatibles con el tipo de desarrollo urbanístico y arquitectónico propio de nuestras localidades, así como con la climatología local.

Según Perales (2008), las raíces del inmovilismo español en esta cuestión son, en parte: la inercia después de siglos evacuando las aguas de lluvia con colectores enterrados sin ni siquiera plantear otras posibilidades, la falta de conocimiento por parte de las administraciones responsables de la contaminación producida por el agua de lluvia y la disparidad de criterios de cálculo y caracterización de los fenómenos de precipitación. Con todo lo expuesto, resulta evidente la necesidad de un cambio en el modo de gestión del agua de lluvia en las áreas mediterráneas españolas. Si este futuro pasa por adoptar las técnicas LID como hilo conductor de las prácticas de drenaje urbano, está aún por esclarecerse.

## 4. Presentación del caso de estudio

### 4.1. Motivación y objetivos

Una vez conocido cuál es el estado del arte en lo que respecta a las nuevas técnicas de drenaje sostenible, tanto en España como en otros países, se centrará a continuación la atención sobre las posibilidades reales que, a día de hoy, tienen las localidades del litoral mediterráneo para aplicar este nuevo enfoque en el drenaje urbano. Como ya se ha comentado, existe cierto escepticismo acerca de esta cuestión y los datos de que se disponen son aún escasos para sacar conclusiones fiables. Aun así, existen iniciativas de aplicación LID en el litoral que defienden que las trabas a un drenaje más sostenible de nuestras ciudades provienen únicamente de la falta de impulso y promoción de las nuevas tendencias. Ante esta situación, se pueden plantear dos preguntas:

- ¿Es capaz un drenaje urbano más sostenible de solucionar los problemas de calidad y cantidad de la escorrentía urbana en localidades del litoral mediterráneo densamente urbanizadas?
- Y en caso afirmativo, ¿Qué papel jugarán las técnicas LID en el sistema de gestión del agua urbana?

Por lo que respecta a la primera pregunta, se intentará responder haciendo referencia a la tesis doctoral de Carmen Sara Perales Momparler (2015), que es posiblemente el texto de investigación sobre drenaje urbano sostenible que más acota el ámbito de estudio al de este trabajo. Con esta tesis, Perales presenta una metodología para llevar a cabo la transición de un drenaje urbano convencional a uno sostenible en una ciudad mediterránea, recalando la importancia de la construcción y monitorización en este proceso. Esta metodología incluye un marco conceptual, métodos y herramientas específicos que permiten entender y caracterizar la situación presente del sistema de gestión de aguas pluviales de una determinada localidad y guiar las futuras acciones hacia una ciudad más sostenible, desde un punto de vista local. Perales afirma que este tipo de casos de estudio monitorizados son el catalizador para la transición de un drenaje convencional a uno sostenible.

La aplicación de esta metodología se puso a prueba en el municipio de Benaguasil. Este es un claro ejemplo de localidad mediterránea afectada por la problemática presentada en este trabajo. Su precipitación media anual es de 432 mm con fuerte estacionalidad y experimenta lluvias con grandes picos de intensidad. La densidad de población además es elevada (4750 hab/km<sup>2</sup>) y la urbanización de las calles altamente impermeable. Luego los problemas de inundaciones por falta de capacidad de los colectores y de contaminación son abundantes.

PMEnginyeria como empresa privada, los municipios de Benaguasil y Xàtiva como institución y una universidad del Reino Unido como grupo de expertos en LIDs formaron el grupo de actores. El proyecto, de nombre AQUAVAL, da comienzo en 2010 y comprende la construcción y monitorización de técnicas LID como paso importante hacia un cambio de paradigma en el drenaje urbano. Tres áreas en Benaguasil y tres en Xàtiva fueron rehabilitadas con el uso de LIDs.

Los datos obtenidos de la monitorización muestran que los LID piloto tienen un buen funcionamiento hidráulico bajo condiciones mediterráneas típicas. El estudio demuestra, también, que los LID son adecuados y fiables en casos de lluvia torrencial. Se presentan a continuación algunos datos que demuestran que el pavimento permeable aplicado en una zona de aparcamiento de Benaguasil retiene prácticamente el 100% de una serie temporal lluvias de intensidad baja y que la cubierta verde de Xàtiva es capaz de reducir el pico de escorrentía más de 6 veces para un evento de intensidad media. En términos de calidad, se prueba que los pavimentos permeables son menos efectivos a la hora de reducir contaminantes que las cunetas verdes y sistemas de infiltración. La mejora de la calidad de la escorrentía es suficiente para cumplir con las ordenanzas municipales de vertido.

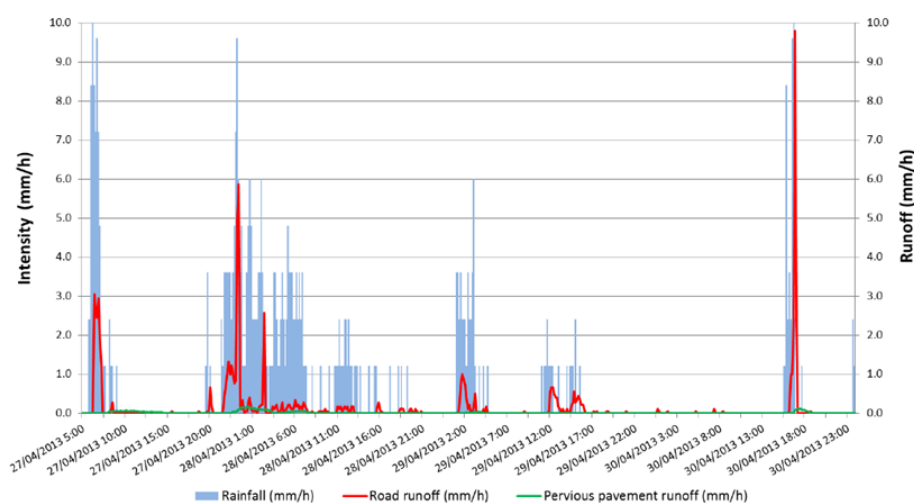


Figura 39: Comparación de la escorrentía generada por el pavimento permeable (verde) en comparación con un pavimento convencional (rojo) durante el Abril de 2013. Fuente: (Perales, Álvarez, & Andrés-Doménech, 2015).

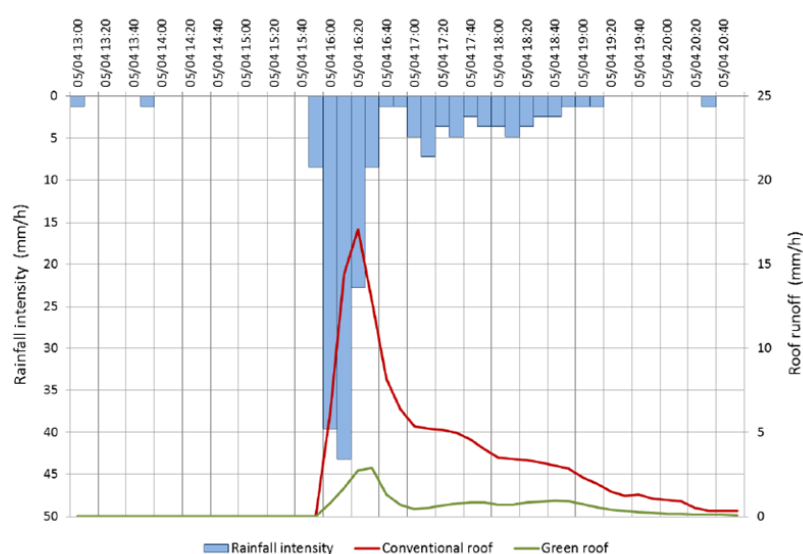


Figura 40: Comparación de la escorrentía generada por la cubierta verde (verde) en comparación con un tejado convencional (rojo) durante el evento de lluvia del 5 de Abril de 2013. Fuente: (Perales, Álvarez, & Andrés-Doménech, 2015).



A efectos de este trabajo, la experiencia de Perales, Álvarez & Andrés-Doménech (2015) sirve como testimonio de proyecto de aplicación de técnicas LID que arroja algo de optimismo ante los posibles beneficios de estos en clima mediterráneo, incluso durante eventos torrenciales. No obstante, se debe matizar que los resultados obtenidos son datos del tratamiento en origen (in-situ) que hace cada uno de los elementos LID, no se trata de resultados a nivel de cuenca. Por lo tanto, no queda claro aún si a escala de ciudad, los LID colaboran en una medida notable a reducir las inundaciones; para ello se necesitaría construir LIDs por toda una localidad y ponerlos a prueba durante un evento de lluvia de alto periodo de retorno.

Podemos dar, por lo tanto, respuesta a la primera pregunta de las dos formuladas anteriormente: Sí, los LIDs son capaces de ayudar a la reducción de los problemas de drenaje urbano en el litoral mediterráneo español; o al menos la tesis doctoral de Perales (2015) nos hace pensar que así es. Aun así, cabe matizar que la escala de los resultados no es la que se necesita para conocer sus beneficios reales a nivel de cuenca.

En relación a la segunda pregunta, se necesita algo de retrospectiva hacia los conocimientos generales sobre los LIDs, presentados en capítulos anteriores. La mayoría de las técnicas LID son capaces de almacenar el agua que cabe en los poros del material constituyente de una o dos de sus capas; éstas serán habitualmente poco profundas. La capacidad de infiltración en el terreno natural es altamente dependiente de la conductividad hidráulica de este y puede variar notablemente en una misma cuenca; esto introduce incertidumbre en el conocimiento, a priori, de la capacidad de infiltración que puede aportar el LID. Por lo tanto, cabe pensar que es prudente ser conservadores a la hora de esperar grandes resultados, por parte de los LID, en eventos de lluvia importantes. Pero eso será así siempre y cuando drenen la escorrentía por sí mismos; el caso habitual será que funcionen de manera paralela a la red de colectores enterrados. Parece razonable pensar que así será por el simple motivo de que, en caso de triunfar, la implementación de técnicas LID será progresiva y pasarán décadas hasta que el drenaje urbano sostenible sea capaz de apartar al convencional completamente (si es capaz de hacerlo en algún momento).

En definitiva, ante la pregunta de qué papel jugarán las técnicas LID a corto plazo en zonas del litoral mediterráneo, desde este trabajo, se responde que un papel rehabilitador. Es decir, se puede afirmar que las técnicas LID aportarán beneficios de todo tipo a la ciudad mientras los eventos de lluvia no superen cierto periodo de retorno y se verán sobre-solicitados durante lluvias torrenciales. Pero eso no implica que no vayan almacenar e infiltrar escorrentía en la medida en que lo necesiten los colectores, para no verse colapsados e inundar las calles. Las técnicas LID pueden convertirse en un elemento drenante perfecto para conseguir reducir, o incluso eliminar, el problema de las inundaciones mediante el almacenamiento e infiltración de la cantidad de escorrentía sobrante; únicamente la que los colectores no son capaces de evacuar por falta de capacidad. Desde esta perspectiva, se pueden dimensionar los sistemas LID para periodos de retorno bajos, que son para los que van a aportar un beneficio diferencial, y dejar que en casos extremos realicen una función de colaboración con la red de colectores existente. Dimensionarlos para periodos de retorno elevados resultaría en LIDs sobre-dimensionados que verían deteriorado su funcionamiento durante las lluvias comunes.

El caso de estudio de este trabajo se encara, entonces, en la línea que se ha dibujado con las respuestas a las dos preguntas anteriores: Se pretende realizar un estudio, a nivel de cuenca

urbana, de la capacidad de las técnicas LID para rehabilitar un sistema de drenaje urbano deficiente durante un evento de lluvia torrencial de elevado periodo de retorno. Partiendo de una red de colectores incapaz de evacuar la escorrentía generada por la tormenta, se pretende averiguar hasta qué punto se deben implementar técnicas de drenaje urbano sostenible para hacer desaparecer el problema.

Como se ha tratado en el capítulo referente a los inconvenientes del drenaje urbano sostenible, a pesar del creciente interés y popularidad de las técnicas LID, aún continúa siendo una disciplina joven con pocos datos fiables que la avalen. Concretamente, son muy escasos los estudios que comparen métodos de drenaje sostenible y convencional, en cuanto a la factibilidad técnica y económica. Además, la gran mayoría de casos de estudio alaban los beneficios de una técnica LID en concreto, basándose en los resultados de captación en origen que se han recopilado. En cambio, es poco común el estudio de qué cantidad de superficie física, esfuerzo institucional e inversión económica es necesaria a escala de ciudad para que el beneficio sea notable. No está comprobado aún que el balance final sea positivo, es decir, que su coste se vea compensado por el valor añadido.

Con este trabajo se pretenden aportar datos de simulación que arrojen algo de luz a esta cuestión; se estudiará hasta en qué medida son los LID capaces de rehabilitar un sistema de drenaje urbano y se discutirá si este método es técnica y económicamente viable, en comparación con el recambio de los colectores por otros de más capacidad. Para ello se van a proponer cuatro escenarios de actuación con técnicas LID; en cada uno de ellos se irán progresivamente aplicando más técnicas LID, acabando por utilizar tanto espacio en superficie como sea posible. Para cada escenario se comentará en detalle qué tipo de LIDs se utilizarán y los beneficios obtenidos en términos de cantidad y calidad de la escorrentía.

El caso de estudio se llevará a cabo mediante la simulación del proceso precipitación-escorrentía en una cuenca urbana del litoral mediterráneo. El software de cálculo a utilizar será el Storm Water Management Model (SWMM) de la U.S. Environmental Protection Agency (EPA), en su versión SWMM 5.1.

## **4.2. Descripción y características de la zona: Cuenca urbana en el centro de Granollers**

El caso de estudio se centra en una cuenca urbana del municipio de Granollers, a 35 km al norte de Barcelona. Granollers se encuentra en la segunda corona del área metropolitana de Barcelona y es la capital y ciudad más densamente poblada del distrito del Vallès Oriental. Se encuentra en la cuenca tributaria del río Besòs, cuyo afluente, el río Congost, cruza el núcleo urbano de Granollers.

La cuenca urbana que se va a utilizar se encuentra en la parte central del municipio y comprende un área aproximada de 10 ha. Esta se encuentra, aproximadamente, delimitada por el Carrer de Ponent, el Camí Ramón Llull, el Carrer Francesc Tarafa y el Carrer de Torres i Bages. Entre los elementos de interés que se pueden encontrar dentro de la cuenca son el Teatro Auditorio de Granollers o la Plaza España. Como travesía importante destaca la Calle de Joan Prim, de 15 metros de ancho, que cruza la cuenca de Norte a Sur; aunque por lo general el resto de calles

son estrechas, de entre 4m y 10m. Las aceras son también estrechas, las zonas peatonales son escasas y las áreas verdes se limitan prácticamente a los patios en domicilios privados. La zona tiene un uso principalmente residencial y comercial y una densidad de población de 150 hab/ha aproximadamente. Su superficie muestra un elevado grado de impermeabilidad; el porcentaje de impermeabilidad se encuentra entre el 77 y el 93%. La cuenca se encuentra en ligera pendiente (inclinaciones de entre 0,05 y 0,022) pero no se alcanzan valores importantes.



Figura 41: Localización de Granollers en la Península Ibérica y en la provincia de Barcelona.



Figura 42: Ortofoto de la cuenca urbana en el centro de Granollers, objeto del caso de estudio. Delimitación de la cuenca urbana del caso de estudio en azul. Fuente: ICC (Institut Cartogràfic de Catalunya).

Se trata, por lo tanto de un área urbana que ejemplifica perfectamente la casuística que se pretende estudiar; una pequeña cuenca del litoral mediterráneo densamente poblada, con calles estrechas y altamente impermeable. Los límites de la cuenca se han escogido de manera que la red de colectores que se encuentran bajo sus calles no reciba caudal de cuencas adyacentes. Además, la topografía de la zona asegura que la escorrentía generada dentro de los límites de la cuenca sea descargada por un único punto de salida. Es importante que la cuenca se delimite de manera que, al aislarla de las cuencas adyacentes, no se estén ignorando caudales que debieran entrar por sus fronteras; de otro modo las simulaciones de caudales no serían realistas. Además, el tamaño de la cuenca debía limitarse por dos motivos: Para que se incluyesen un número reducido de zonas verdes, y así situar el estudio en un escenario lo más desfavorable posible, de manera que los resultados sirviesen de aplicación a todo tipo de tramas urbanas; y para simplificar la tarea de modelización.

El modelo SWMM5 de esta cuenca urbana de Granollers que se va a utilizar para el cálculo del sistema de drenaje será el mismo utilizado por Seco & Gómez (2014) en su tesis doctoral. El modelo SWMM5 podrá ser reutilizado en su mayoría en lo que respecta a características propias de la cuenca, que fueron recogidas por Seco & Gómez (2014) in-situ o calibradas mediante la monitorización de la red de colectores.

### 4.3. Hidrología

#### 4.3.1. Pluviometría

La climatología típica de la zona de Granollers se corresponde con el clima mediterráneo habitual, comentado con detalle en el capítulo 2.1.1. *Principales características de las precipitaciones*. La precipitación total anual en la cuenca objeto de estudio oscila entre 500-700 mm, aunque el volumen de agua precipitado no se distribuye de manera uniforme a lo largo del año. Por ejemplo, el 33% de los eventos de tormenta registrados entre Mayo del 2010 y Mayo del 2012 presentaron una precipitación acumulada de más de 10 mm, de los cuales un 23% ocurrió con un periodo seco precedente de más de una semana; periodos de sequía de alrededor de 60 días durante los inviernos son relativamente comunes (Seco & Gómez, 2014). Por lo tanto, el régimen pluviométrico en la zona de estudio se corresponde perfectamente con la irregularidad de precipitaciones típica del clima mediterráneo, en el que largos periodos de tiempo de sequía vienen habitualmente seguidos de precipitaciones torrenciales que arrastran gran cantidad de contaminantes e inundan las calles.

Una de las maneras de representar el régimen pluviométrico de la zona sería el uso de una serie temporal de eventos de lluvia estadísticamente independientes, con el objetivo de obtener una caracterización lo más completa posible del proceso temporal de precipitación. Este método resulta excelente para representar fielmente la frecuencia de ocurrencia de los eventos de interés; es decir, de las inundaciones y vertidos de grandes cargas de contaminantes. Sin embargo, resulta complejo obtener un registro de datos lo suficientemente extenso como para que contenga eventos relevantes. Además, el tiempo de simulación se incrementa notablemente con series temporales de lluvia tan largas. Por ello, para este estudio, se va a utilizar una



tormenta de diseño como dato pluviométrico. La lluvia de diseño asocia una lluvia sintética a un periodo de retorno; es decir, se utiliza una lluvia teórica con una determinada frecuencia de excedencia. El inconveniente, en este caso, es que se utiliza la frecuencia de lluvias y no de inundaciones y contaminación, que no tienen por qué coincidir.

A la hora de escoger un periodo de retorno para la lluvia de diseño que se va a utilizar en este caso de estudio, se debe tener en cuenta que el objetivo es rehabilitar la red de drenaje existente. La lluvia de diseño escogida no va a ser la que sirva para dimensionar los LID, sino aquella que el sistema de drenaje, al completo, debería ser capaz de evacuar. Un periodo de retorno que se utiliza habitualmente para el diseño y dimensionamiento de redes de drenaje es 10 años. Para el cálculo del hietograma de la lluvia de diseño se necesitan las curvas intensidad-duración-frecuencia (IDF) de la zona. En este trabajo se va a utilizar la curva IDF propuesta por Casas & Redaño (1995):

$$I(t, T) = \frac{19 \log(T) + 23}{(13 + t)^{0,87}} \quad \text{Ecuación 1}$$

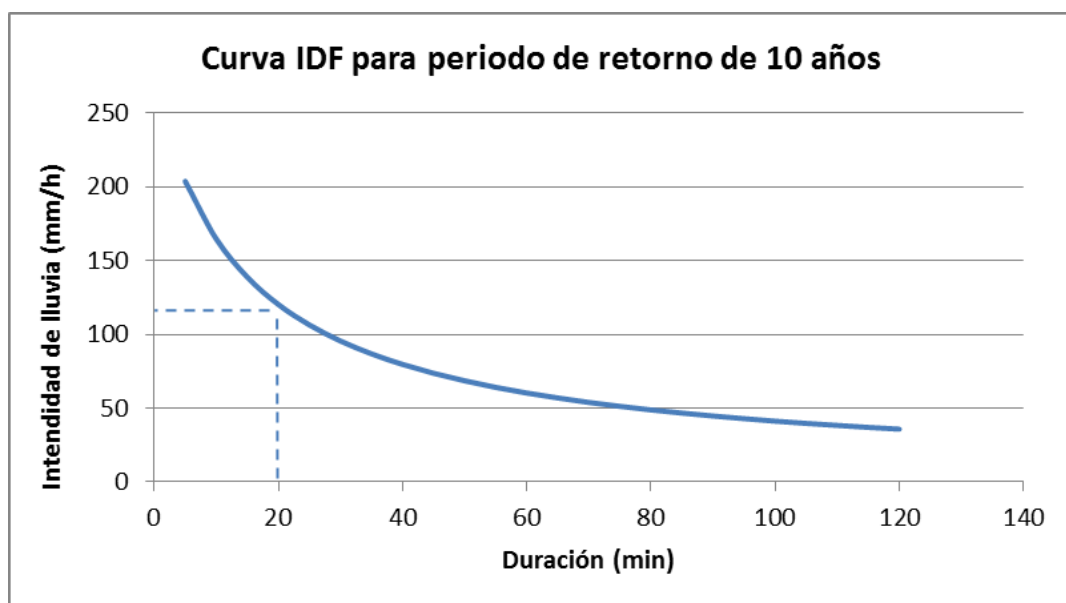


Figura 43: Curva IDF propuesta por Casas & Redaño (1995) para la zona de Barcelona.

La intensidad de lluvia (I) se expresa en mm/h, la duración (t) en minutos y el periodo de retorno (T) en años. Un método muy común para la obtención de la lluvia de diseño es el de los bloques alternados; este método es el que extrae más información de la curva IDF ya que utiliza varios puntos de esta. Es el método de uso más adecuado cuando las curvas IDF tienden a ser empinadas.

Para su uso deberemos escoger la duración del evento de lluvia y el intervalo de tiempo que queremos que represente cada bloque del hietograma; en este caso se van a utilizar 2 horas y 5 min respectivamente. La intensidad de lluvia del primer bloque del hietograma será la máxima intensidad posible en 5 min, que se extrae directamente de la curva IDF. El segundo bloque

tendrá en cuenta la máxima intensidad de lluvia asociada a un evento de 10 min; para ello se calcula el volumen de precipitación asociado a esos 10 min, multiplicando intensidad por duración, y a este valor se le resta el volumen de precipitación de 5 min. El resultado se divide por 5 min para obtener de nuevo un valor de intensidad, que será el que utilizaremos para el segundo bloque del hietograma. Para obtener el tercer bloque calcularemos la precipitación asociada a 15 min y le restaremos la de 10 min; este valor se dividirá también por 5 min para convertirlo en intensidad. Siguiendo este proceso hasta las 2 horas de duración total de la lluvia de diseño se irán obteniendo los diferentes bloques del hietograma. Una vez obtenidos, éstos se pueden reordenar en función de la forma común de la lluvia en la zona de estudio. El cálculo de la lluvia de diseño se puede consultar en el ANEXO 1. El hietograma de intensidades resultante es el siguiente:

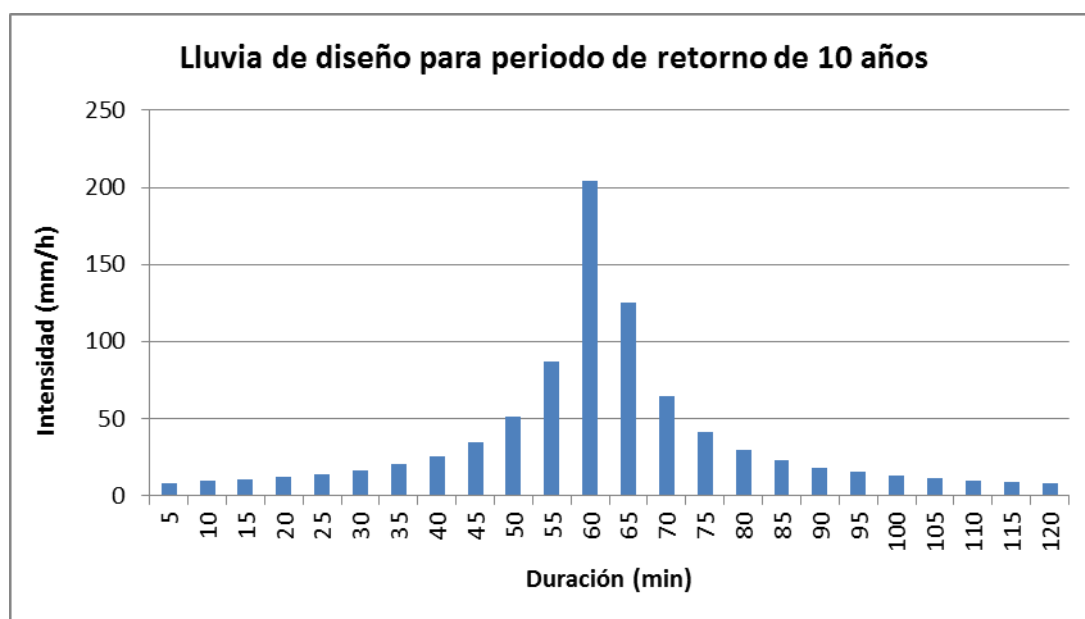


Figura 44: Hietograma de intensidades de la lluvia de diseño para un periodo de retorno de 10 años, mediante el método de los bloques alternos.

Se comprueba como la lluvia resultante presenta intensidades de lluvia muy elevadas en intervalos de tiempo muy reducidos. Las diferencias entre bloques se acentúan a medida que crecen las intensidades; solamente en los 15 min de lluvia más intensa cae el mismo volumen de agua que en los 105 min restantes. Por lo tanto se puede concluir que esta lluvia de diseño ejemplifica perfectamente las características pluviométricas del clima mediterráneo.

#### 4.3.2. Proceso lluvia-escorrentía

En el proceso de formación de escorrentía en las cuencas intervienen una serie de procesos aparte de la lluvia. Es importante analizar las características de la cuenca y establecer los criterios adecuados para describir y simular la transformación de la precipitación en escorrentía. Una vez el agua de lluvia ha precipitado, no toda ella se convertirá en escorrentía superficial, se



producen una serie de pérdidas; los principales tipos de pérdida son la infiltración, la evaporación y la retención en superficie. Tres de los métodos que el código SWMM5 incorpora para el cálculo de las pérdidas de precipitación son la ecuación de Horton, el método Green-Ampt y el método del número de curva del SCS (Soil Conservation Service).

#### **4.3.2.1. Retención en superficie e interceptación**

Mientras la intensidad de lluvia sea menor a la capacidad de infiltración potencial, el suelo infiltrará a un ritmo menor a su potencial. Si la intensidad de lluvia supera ese potencial, el agua se irá acumulando en superficie y la infiltración se producirá a la máxima velocidad posible según las condiciones del terreno. El agua que se queda en superficie puede convertirse en escorrentía superficial o acumularse en zonas deprimidas. Esta parte de la lluvia que queda retenida en superficie se puede dividir entre la acumulación en depresión y la interceptación por parte de plantas u otros elementos que impiden que la lluvia alcance la superficie del terreno. Este tipo de pérdidas deberá ser estimado de la manera más precisa posible con un análisis detallado del tipo de superficie y vegetación de la cuenca; en la mayoría de casos estas pérdidas son del orden de milímetros. No obstante, en cuencas urbanas llanas como la del caso de estudio, el agua es más susceptible de ser retenida en superficie debido al alto grado de impermeabilidad del terreno.

Para tener en cuenta la cantidad de agua que se almacena en superficie en SWMM5 se le debe asignar a cada sub-cuenca un valor de retención en mm para zonas permeables y otro valor para zonas impermeables, así como el porcentaje de suelo impermeable que no presenta pérdidas de este tipo. Para la determinación de estos valores se debe tener en cuenta el tipo de zonas ajardinadas, las pendientes, el tipo y calidad de los pavimentos, etc. No son parámetros fáciles de estimar de manera precisa, luego deben aproximarse lo más rigurosamente posible. Valores recomendados por Gómez (2007) oscilan entre 1,2 - 2,5 mm para áreas impermeables y entre 8 - 9 mm para áreas permeables. Los valores utilizados finalmente en el modelo SWMM5 se pueden encontrar en el ANEXO 2.

#### **4.3.2.2. Evapotranspiración**

La evapotranspiración es la combinación de evaporación del agua que se encuentra en la superficie del suelo y de la transpiración a través de la vegetación. Los factores que gobiernan la evaporación del agua en superficie también lo hacen para la transpiración; el aporte de energía proveniente de la radiación solar para proveer el calor latente de vaporización y la capacidad de transportar el vapor lejos de la superficie de evaporación, que depende de la velocidad del viento (Chow, 1988).

En SWMM5, la evapotranspiración afecta principalmente al agua retenida en superficie que, como se ha comentado, es habitualmente del orden de unos pocos milímetros. La transpiración a través de las plantas será muy reducida debido a las escasas zonas verdes de la cuenca de estudio. Además, al tratarse de una simulación de unas pocas horas en la que intervienen grandes

volúmenes de agua, será un proceso con poco interés práctico en este estudio; por este motivo se va a menospreciar el efecto de la evapotranspiración en este trabajo.

#### 4.3.2.3. Infiltración

Chow (1988) describe la infiltración como el proceso por el que el agua penetra desde la superficie del suelo hacia dentro del terreno. Muchos factores influyen en la capacidad de infiltración; entre ellos se encuentran el estado de la superficie y su cobertura vegetal, propiedades del suelo como la porosidad y su conductividad hidráulica y el contenido de humedad del suelo. Debido a las grandes variaciones de estas propiedades en el espacio y el tiempo, la infiltración es un proceso muy complejo de describir; se acostumbra a aproximar por medio de ecuaciones matemáticas.

##### Ecuación de Horton

Se trata de uno de los métodos más antiguos de los que se conocen para medir la capacidad de infiltración en un medio poroso. Lo desarrolla Horton (1933), quien descubre que la infiltración comienza a cierta capacidad ( $f_0$ ), y decrece exponencialmente hasta alcanzar un ritmo constante ( $f_c$ ):

$$f(t) = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde  $k$  es una constante de decaimiento. Se ha demostrado que la ecuación de Horton puede ser derivada de las ecuaciones de continuidad y de conservación del momento para el flujo en un medio poroso no saturado, considerando que la constante de Darcy y la difusividad del agua en los poros son independientes del grado de humedad del suelo. Para el uso del método de Horton en SWMM5 se deben conocer  $f_c$ ,  $f_0$  y  $k$ .

##### Método de Green-Ampt

Green y Ampt (1911) proponen, en vez de buscar soluciones aproximadas a las ecuaciones de continuidad y conservación del momento del flujo en medio poroso, resolver de manera exacta las ecuaciones que describen un proceso de infiltración simplificado. Ellos definen el frente mojado como la frontera entre el suelo con contenido de humedad inicial  $\theta_i$  y el suelo ya saturado con contenido de humedad  $\eta$  (equivalente a la porosidad en este caso). Este frente ha penetrado hasta una profundidad  $L$  en un tiempo  $t$  desde que la infiltración comenzó. La ecuación de continuidad sería la siguiente:

$$F(t) = L(\eta - \theta_i) = L \Delta\theta \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde  $F$  es la profundidad de agua infiltrada acumulada en el tiempo  $t$ . La ecuación de conservación del momento equivale a la ecuación de Darcy con flujo constante en la profundidad:

$$f(t) = K \frac{\partial h}{\partial z} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde  $h$  es la altura piezométrica,  $z$  la profundidad y  $K$  la conductividad hidráulica. Se demuestra que, a partir de estas dos expresiones, se obtiene:

$$f(t) = K \left( \frac{\psi \Delta \theta}{F(t)} + 1 \right) \quad \text{Ecuación 5}$$

$$F(t) = Kt + \psi \Delta \theta \ln \left( 1 + \frac{F(t)}{\psi \Delta \theta} \right) \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde  $\psi$  es la altura de succión en el frente de humedad. Resolviendo iterativamente la segunda expresión se obtiene la profundidad de agua infiltrada acumulada en el tiempo  $t$  con la que se puede calcular la capacidad de infiltración. Para aplicar el método de Green Ampt se requiere conocer  $K$ ,  $\eta$ ,  $\theta_i$  y  $\psi$ . SWMM5 requiere como datos de partida altura de succión, conductividad hidráulica y  $\Delta \theta$  (diferencia entre la porosidad del terreno y la humedad del suelo).

#### Método del número de curva (CN)

Este método fue desarrollado por el Soil Conservation Service (SCS) en 1972 para calcular las pérdidas producidas al formarse la escorrentía después de un evento de lluvia. Este método, a diferencia de los otros dos explicados anteriormente, tiene en cuenta el proceso de pérdidas en conjunto, de manera que incorpora tanto la infiltración como la retención e intercepción.

Para cualquier lluvia, la cantidad de agua que se convierte en lluvia efectiva (sin pérdidas,  $P_e$ ) siempre es menor que la lluvia total precipitada ( $P$ ); del mismo modo el agua infiltrada en la cuenca ( $F_a$ ) es menor que una hipotética máxima retención potencial ( $S$ ). La parte de lluvia que se pierde antes de iniciarse el proceso de escorrentía se denomina  $I_a$ . La hipótesis planteada por el SCS es que se cumple la siguiente igualdad:

$$\frac{F_a}{S} = \frac{P_e}{P - I_a} \quad \text{Ecuación 7}$$

Por el principio de continuidad se conoce que  $P = P_e + I_a + F_a$ , luego:

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad \text{Ecuación 8}$$

Que es el método para obtener la cantidad de lluvia que no se pierde y por lo tanto se convierte en escorrentía superficial. El SCS propone una relación de  $I_a = 0,2 S$  para simplificar el proceso y reducir el número de incógnitas, pero en SWMM5 se mantienen como variables independientes para que el usuario pueda escoger el valor de retención en superficie. Se define el número de curva (CN) como:

$$\text{Ecuación 9}$$

$$S = \frac{25400}{CN} - 254$$

El SCS tabula en CN dándole valores de 0 a 100 en función del tipo y uso del suelo. Por lo tanto, el uso del método del CN en SWMM5 solamente requiere de la estimación del CN para cada sub-cuenca. Por este motivo se ha decidido utilizar este método integral de cálculo de las pérdidas de precipitación; dada la incertidumbre en las propiedades de la cuenca de estudio es conveniente reducir también las variables a estimar. El CN utilizado en cada sub-cuenca para el caso de estudio se puede consultar en el ANEXO 2.

#### 4.3.3. Sub-cuencas

Para el cálculo hidrológico del caso de estudio se debe llevar a cabo una división de la cuenca principal del casco urbano de Granollers en sub-cuencas de menor tamaño. El objetivo es capturar el efecto de la variabilidad espacial en la topografía, cauces de drenaje, impermeabilidad, características del suelo y conexiones a la red de drenaje de la cuenca a la hora de generar escorrentía. A mayor nivel de detalle en este proceso, más fielmente se están representando los procesos hidrológicos simulados por SWMM5. La delimitación perfecta de las sub-cuencas sería dividir la superficie en tantas sub-cuencas como puntos de conexión a la red de drenaje existan; esto implicaría tener en cuenta cada uno de los imbornales en las calles y asociarles a estos el área que genera la escorrentía que estos van a captar. Cada sub-cuenca debe, idealmente, representar un sector de la cuenca de propiedades uniformes. En muy pocas ocasiones se modelan las sub-cuencas urbanas a este nivel de detalle, ya que estas serían de tamaño muy reducido y alargaría notablemente el proceso de modelización y complicaría en gran medida la aplicación de las técnicas LID al modelo. La delimitación que se ha llevado a cabo ha considerado como sub-cuenca el área que drena hacia cada uno de los pozos de registro de la red. Es decir, toda la superficie de cuenca cuya escorrentía entra a la red de drenaje en cualquier punto de los colectores que se encuentran entre dos pozos de registro se considera de una misma sub-cuenca. Para compensar las simplificaciones que se llevan a cabo en la delimitación de las sub-cuencas, SWMM5 permite la subdivisión de cada una de estas en área permeable e impermeable por la gran diferencia entre una tipología y otra a la hora de generar escorrentía. Dentro de la porción impermeable de la sub-cuenca, se llevará a cabo la división entre impermeable con y sin retención superficial.

Para encontrar las fronteras de drenaje de cada sub-cuenca se han utilizado los planos de la red de drenaje y de cartografía disponibles en la página web del ayuntamiento de Granollers, así como las ortofotos descargables del Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC). El uso exclusivo de topografía puede derivar en una división errónea de las sub-cuencas, ya que el drenaje puede transportar la escorrentía en la dirección opuesta que lo hacen las pendientes en superficie. La división final de la cuenca de estudio resulta en 42 sub-cuencas, que continúa siendo un número elevado aunque razonable para una cuenca de más de 10 ha. La delimitación de las sub-cuencas, junto con el esquema de la red de colectores, se muestra en la figura a continuación y los datos correspondientes a cada una de ellas se pueden consultar en el ANEXO 2.



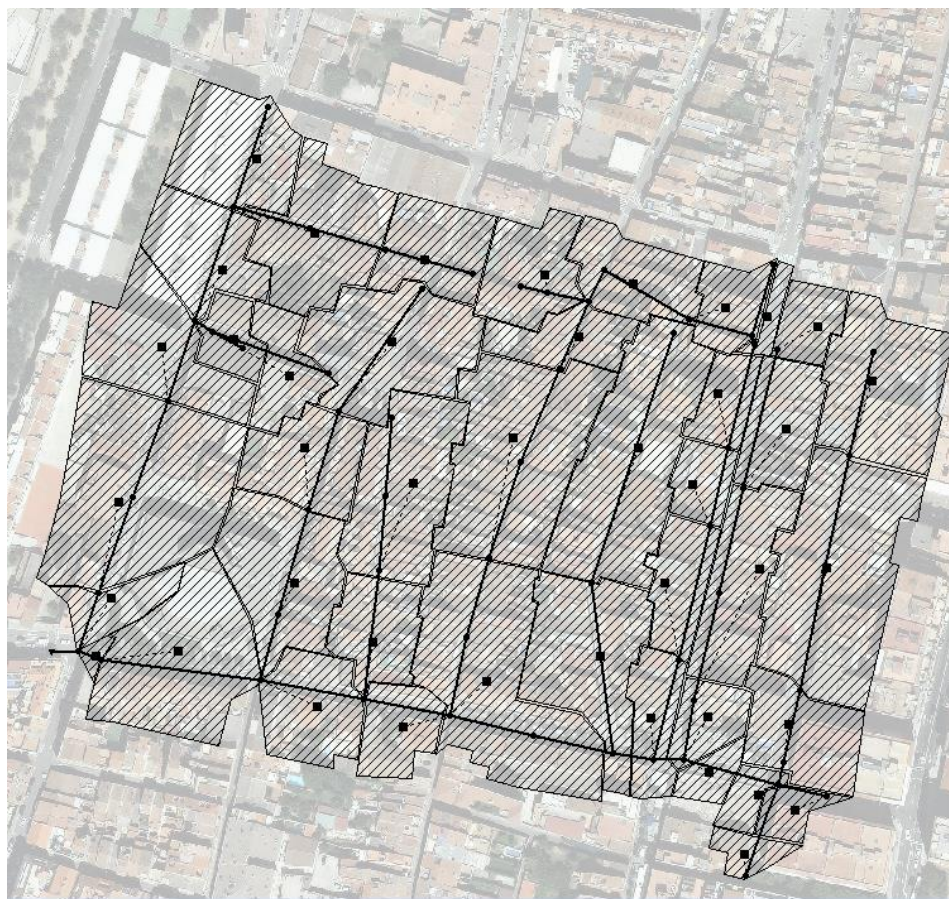


Figura 45: División de la cuenca de estudio en sub-cuencas con SWMM5.

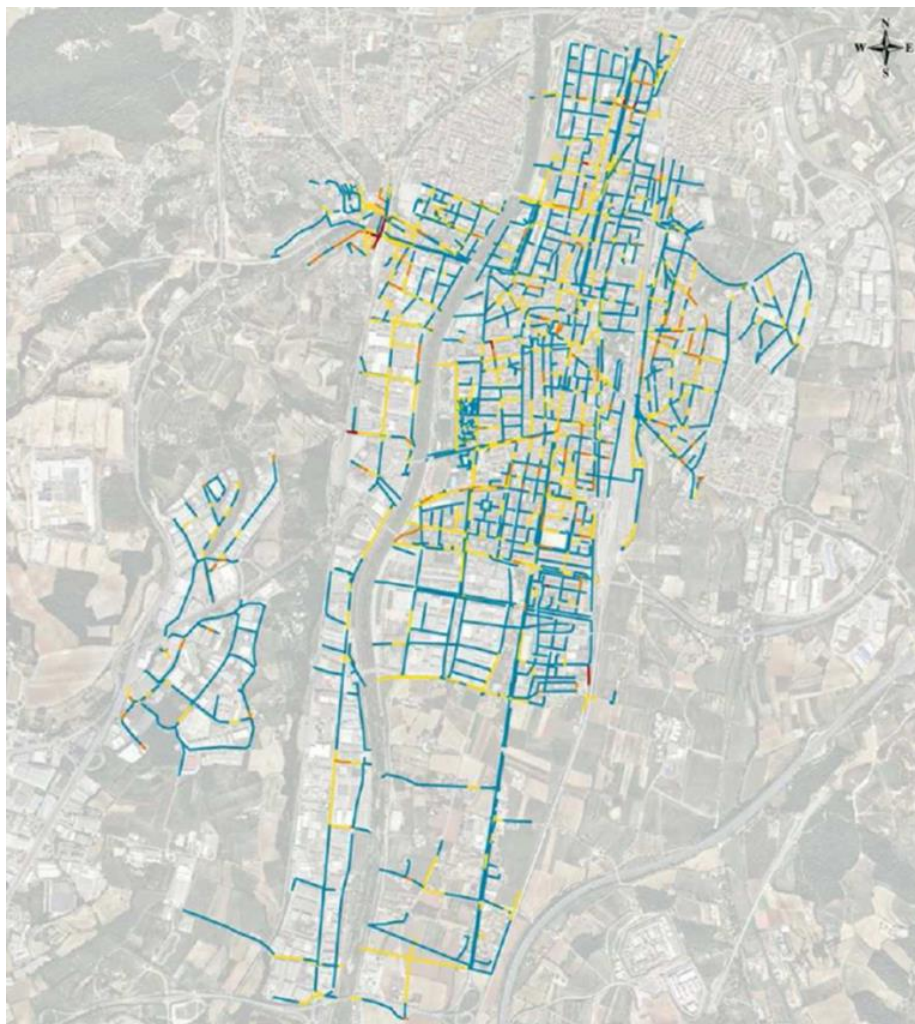
#### 4.4. Descripción de la red de drenaje actual

La red de alcantarillado de Granollers es una red unitaria clásica de colectores y galerías enterrados bajo las calles. Esta cuenta en total con 5800 imbornales, 300 rejás, 3500 pozos de registro y 135 km en total de conducciones (1 pozo de registro cada 43 m). Por lo tanto se trata de una red extensa que cubre gran parte de los 14,9 Km<sup>2</sup> cuadrados de superficie del municipio. Las dimensiones de dichas conducciones oscilan entre colectores circulares de 200 mm de diámetro hasta galerías de 2900x2000 mm; la mayoría son de sección circular, de hormigón y entran en el rango de 300 y 500 mm de diámetro (Datos de Drenatges Urbans del Besós, S.L.).

El sector de la red de alcantarillado que nos interesa en este estudio es el que recogerá la escorrentía de la cuenca anteriormente descrita. Esta presenta una estructura arborescente, por lo que el agua tiene un único camino para ir desde un punto A hasta otro B aguas abajo. En la simulación que se llevará a cabo están implicados 57 tramos de colectores (entendiendo por tramo el segmento entre dos pozos de registro), todos ellos de sección circular y de hormigón en masa. La longitud total de colectores en la cuenca es de 2,2 Km. Estos colectores se reparten en toda la superficie de la cuenca pero se pueden distinguir dos ejes principales en la red; los colectores bajo el Carrer de Ponent y bajo el Carrer de Josep Torras i Bages, al oeste y sur de la cuenca respectivamente. Estos ejes recogen los caudales provenientes del resto de la red y los conducen al único punto de salida de la cuenca; un colector circular de 1m de diámetro y una

pendiente del 0,2%. En el caso de los colectores bajo el Carrer de Josep Torras i Bages esto se corresponde con un mayor diámetro de colector, que alcanza el valores de 1 m; no sucede así en los colectores bajo el Carrer de Ponent que disponen de diámetros entre 0,3 y 0,4 m. El resto de colectores que conforman la red tienen diámetros de entre 0,3 y 0,8 m. Las pendientes de los diferentes tramos oscila entre 0,1% y 11%, pero la gran mayoría de ellos se encuentra en el rango entre 1% y 1,8%. La red dispone también de 58 pozos de registro de altura variable entre 0,83m y 3,86m. Los datos de cada uno de los elementos que componen la red de drenaje de la cuenca de estudio fueron recopilados por Seco y Gómez (2014) y se pueden consultar en el ANEXO 2.

Según el Plan Director del estado de la red de alcantarillado de Granollers, a día de hoy, los tramos de colector que corresponden a la cuenca de estudio se encuentran en un estado bueno en general, excepto algunos tramos que se encuentran en estado regular o malo. Los factores evaluados son estructurales (antigüedad, materiales, deficiencias detectadas), de riesgo (tráfico pesado y raíces de arbolado) e hidráulicos (Plan Director de Alcantarillado).



**Figura 46:** Esquema completo de la red de drenaje urbano del municipio de Granollers. En verde colectores en estado muy bueno, en azul bueno, en amarillo regular, en naranja malo y en rojo muy malo. Fuente: Drenatges Urbans del Besós, S.L. (Pujadas, 2016).



## 5. Modelado del caso de estudio en SWMM5

### 5.1. Descripción del software de cálculo

Durante los años 1960 crece en EEUU la preocupación en relación a las inundaciones urbanas y el severo vertido de contaminantes al medio por causa de la contaminación difusa de origen urbano y de la descarga de las redes unitarias de alcantarillado. También aparecen los primeros ordenadores modernos y el desarrollo de complejas herramientas de análisis hidráulico e hidrológico. En este contexto la Environmental Protection Agency desarrolla el software SWMM5 (Storm Water Management Model) en 1969-1971, que se ha mantenido actualizado hasta día de hoy y es quizás el más ampliamente conocido y utilizado modelo de cálculo de cantidad y calidad de escorrentía urbana.

SWMM5 es un modelo de simulación lluvia-escorrentía que puede ser utilizado para el cálculo de la cantidad y calidad del agua en medio urbano, tanto para eventos de lluvia individuales como continuos. El componente de cálculo hidrológico de SWMM5 transforma la precipitación recogida en cada sub-cuenca en escorrentía, e incluye a petición del usuario una carga de contaminantes. El componente de cálculo hidráulico transporta esta escorrentía a través de un sistema de conductos, canales a cielo abierto, depósitos y elementos de tratamiento, bombas y reguladores. SWMM5 monitoriza la cantidad y calidad de la escorrentía generada en cada sub-cuenca, y el caudal, calado y calidad del agua que circula por cada colector durante el periodo de simulación deseado.

En resumen SWMM5 modeliza los elementos que componen un sistema de drenaje urbano típico. SWMM5 conceptualiza este sistema como una transferencia de flujos de agua y contaminantes entre los principales elementos de la red y el medio receptor:

- La atmósfera, que genera precipitación y deposita contaminantes en la superficie.
- La superficie de la cuenca, que recibe la precipitación y deriva los caudales generados en forma de evaporación, de nuevo a la atmósfera, infiltración hacia el subsuelo y escorrentía hacia la red de drenaje.
- El subsuelo que recibe la infiltración de parte de la superficie y puede transferir una porción de lo recibido a la red de drenaje.
- La red de drenaje comprende una serie de elementos que derivan los caudales que recibe hacia el medio receptor o plantas de tratamiento.

En definitiva, SWMM5 lo que hace es modelizar el ciclo del agua en medio urbano, teniendo en cuenta los impedimentos que genera la urbanización al desarrollo natural del drenaje de una cuenca. SWMM5 es capaz de modelizar redes de drenaje tanto unitarias como separativas, así como cuencas y cauces naturales. Los principales elementos que contiene un modelo en SWMM5 son:

- Sub-cuencas (“subcatchment”): Se definen con una serie de parámetros característicos y transforman la lluvia que cae sobre ellas en escorrentía. Esta escorrentía se conecta a la red de drenaje en uno de los nodos de la red.
- Pluviómetro (“Rain Gauge”): Es la serie temporal de lluvias que se desea utilizar para la modelización.

- Uniones (“junctions”): Pueden representar pozos de registro o simplemente nodos de cambio de dirección, pendiente, geometría, etc. de la red de drenaje. Su capacidad de retención es despreciable.
- Conductos (“conduits”): Cada uno de los tramos de la red de drenaje entre dos nodos de la misma. Pueden representar colectores, canales, etc. con todo tipo de secciones transversales.
- Salida (“outfall”): Se trata del nodo de la red de drenaje que representa su final; el vertido a un medio receptor. Puede ser realmente el vertido al medio o simplemente hacia otro sector de una red más amplia o a la planta depuradora. En este punto la elevación de la lámina de agua es conocida en general.

Los procesos que SWMM5 modeliza utilizando los objetos descritos previamente y como se relacionan unos con otros puede consultarse en la siguiente figura:

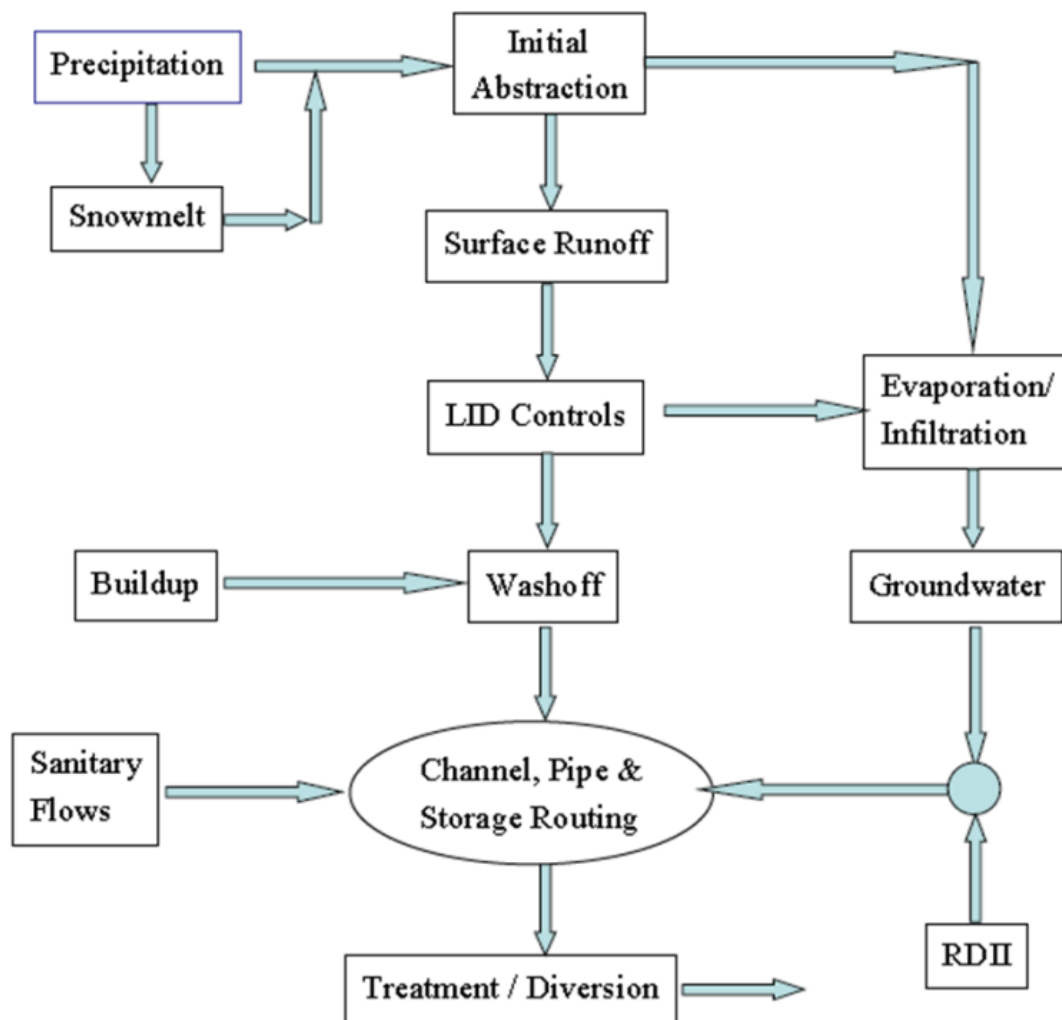


Figura 47: Esquema de procesos modelizados por SWMM5 y las conexiones entre ellos. Fuente: SWMM Reference Manual, Volume I.

## 5.2. Métodos de modelización y cálculo

### 5.2.1. Proceso lluvia – escorrentía

Como ya se ha comentado, SWMM5 convierte datos de precipitación efectiva (una vez restadas las pérdidas) en escorrentía urbana superficial. El hecho de que la cuenca de estudio se divida en una serie sub-cuencas de menor tamaño permite captar el efecto de la variabilidad espacial. Por lo tanto, SWMM5 calcula la escorrentía generada en cada una de las sub-cuencas por separado.

SWMM5 conceptualiza la sub-cuenca como una superficie rectangular de área  $A$ , con pendiente uniforme  $S$  y ancho  $W$  que drena hacia un único punto de evacuación. La escorrentía superficial se genera modelizando la sub-cuenca como un depósito no lineal:

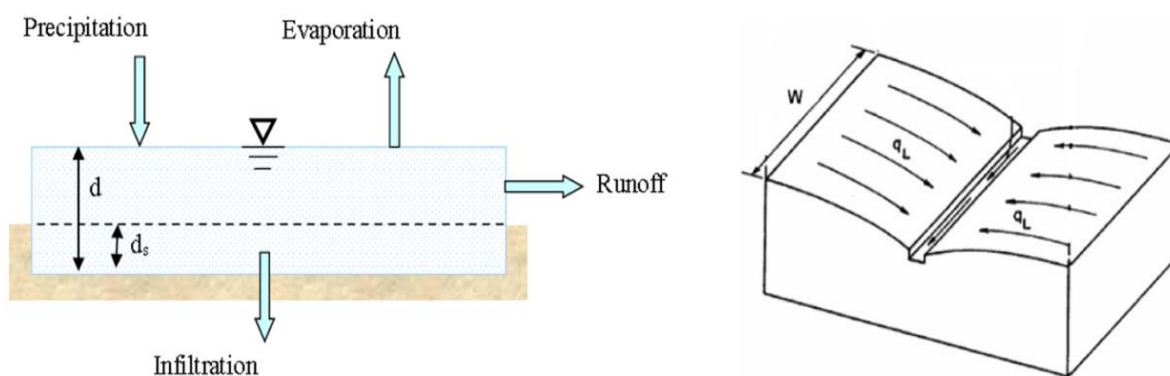


Figura 48: Esquema de la modelización de la sub-cuenca (izquierda) y la conceptualización de una sub-cuenca (derecha) en SWMM5. Fuente: SWMM Reference Manual, Volumen I.

Según el esquema de la figura anterior, la sub-cuenca recibe un caudal de entrada procedente de la precipitación y pérdidas por infiltración, almacenamiento en depresiones del terreno y evapotranspiración (recordemos que en este estudio se menospreciará su efecto). La lluvia se acumulará en superficie hasta la altura  $d_s$ , que representa la capacidad de retención en superficie que se le ha otorgado a la sub-cuenca. A partir del planteamiento de conservación de la masa se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{\partial d}{\partial t} = i - e - f - q \quad \text{Ecuación 10}$$

Que expresa el cambio en la altura de la lámina de agua “ $d$ ” en el tiempo como la diferencia entre caudales entrantes y salientes.

- $i$  = intensidad de precipitación
- $e$  = evaporación

- $f$  = infiltración
- $q$  = caudal de escorrentía superficial

Asumiendo que el flujo de agua por la superficie de la sub-cuenca se comporta como flujo uniforme en un canal rectangular de ancho  $W$ , altura  $d - d_s$ , y pendiente  $S$ , la fórmula de Manning se puede utilizar para expresar el caudal de escorrentía  $Q$ :

$$Q = \frac{1}{n} S^{1/2} R_h^{2/3} A \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde  $n$  es el coeficiente de Manning de la superficie,  $A$  el área de la sección transversal del supuesto canal rectangular (de altura  $d - d_s$  y ancho  $W$ ) y  $R_h$  el radio hidráulico asociado a este área. Dado que  $W$  será siempre mucho mayor que  $d$ , podemos aproximar  $R_h = d - d_s$ , luego:

$$Q = \frac{1}{n} W S^{1/2} (d - d_s)^{5/3} \quad \text{Ecuación 12}$$

$$q = \frac{W S^{1/2} (d - d_s)^{5/3}}{A n} \quad \text{Ecuación 13}$$

Substituyendo esta última ecuación en la expresión original del balance de masas, esta resulta en:

$$\frac{\partial d}{\partial t} = i - e - f - \alpha (d - d_s)^{5/3} \quad \text{Ecuación 14}$$

$$\alpha = \frac{W S^{1/2}}{A n} \quad \text{Ecuación 15}$$

La ecuación anterior es una ecuación diferencial no lineal ordinaria. Para valores conocidos de  $i$ ,  $e$ ,  $f$ ,  $d_s$  y  $\alpha$  se puede resolver numéricamente para cada intervalo de tiempo para obtener la altura de agua acumulada  $d$ . Una vez  $d$  es conocido, los valores de escorrentía  $q$  pueden ser encontrados. En el caso de que  $d$  sea menor que  $d_s$  el valor de escorrentía superficial es cero y el balance de masas se simplifica. Esta ecuación se resolverá para cada porción de área impermeable, impermeable sin retención superficial y permeable de cada sub-cuenca. Las diferencias entre las tres distintas tipologías de área dentro de una misma sub-cuenca, a la hora de resolver la ecuación, serán el coeficiente de Manning  $n$  y el área en superficie de cada una de estas; ancho y pendiente se mantienen constantes en la sub-cuenca al completo.

A partir de 2001, SWMM5 permite la derivación de los caudales de escorrentía generados en una determinada área dentro de la sub-cuenca hacia las otras dos; permite incluso la derivación de caudales entre diferentes sub-cuencas. Esta es una opción muy útil para la aplicación de LIDs en SWMM5. Los caudales finales resultantes para cada una de las áreas pertenecientes a las diferentes sub-cuencas será el caudal que se encuentra en esa área en concreto después de haberse efectuado todas las transferencias de caudales entre áreas. El caudal total correspondiente a la escorrentía superficial generada en una misma sub-cuenca se conecta a la red de drenaje subterránea por medio de uno de los nodos de la misma.

### 5.2.2. Cálculo hidráulico en la red de colectores

El cálculo que lleva a cabo SWMM5 del flujo de agua en los conductos de la red de drenaje se basa en los principios de conservación de la masa y cantidad de movimiento para el flujo gradualmente variado, no permanente; es decir, las ecuaciones de Saint Venant.

La ecuación de conservación de la masa:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q \quad \text{Ecuación 16}$$

La ecuación de conservación de la cantidad de movimiento:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial y}{\partial x} = gA (I_0 - I_f) \quad \text{Ecuación 17}$$

Donde  $Q$  es el caudal circulante,  $A$  es la sección transversal del conducto ocupada por el flujo de agua,  $x$  es la abscisa en la dirección del conducto,  $t$  es el tiempo,  $q$  el caudal específico,  $g$  la aceleración de la gravedad, y el calado,  $I_0$  es la pendiente del conducto e  $I_f$  es la pendiente de la línea de energía. Este es un caso de sistema de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales, no lineales y de tipo hiperbólico, que carecen de solución analítica. SWMM5 es capaz de representar los siguientes procesos en la red de colectores:

- Captación del flujo de agua proveniente de la escorrentía superficial, infiltración de agua freática, caudales sanitarios y otros caudales entrantes en la red definidos por el usuario.
- Flujo gradualmente variable a través de cualquier tipo de configuración de canal, conducto y depósito.
- Varios posibles regímenes de flujo como rápidos o lentos, entrada en carga, inversión de flujo, etc.
- Regulación del flujo por medio de bombas, orificios, vertederos, etc.

En SWMM5, el usuario tiene la posibilidad de escoger entre tres metodologías de cálculo para resolver las ecuaciones de Saint Venant:

#### Flujo uniforme

Representa el modo de cálculo más simple posible, asumiendo que en cada intervalo de tiempo computacional el flujo de agua es uniforme y permanente. Esto equivale a que los hidrogramas de entrada se trasladan del nodo aguas arriba hacia el nodo aguas abajo sin desfase ni deformación. La relación entre calado y caudal se obtiene por medio de la fórmula de Manning.

Este tipo de cálculo no tiene en cuenta el almacenamiento de agua en conductos, efectos de remanso, resaltos hidráulicos, pérdidas en entradas y salidas, entradas en carga o flujo inverso. Solo se puede utilizar en redes de drenaje en las que cada nodo tenga un único conducto de

salida. El modelo de flujo uniforme es independiente de los incrementos de tiempo de cálculo y es solamente apropiado para análisis preliminares y pre-dimensionamiento de redes.

### Onda cinemática

Este método resuelve la ecuación de continuidad junto con una forma simplificada de la ecuación de la cantidad de movimiento en cada conducto. Esta última asume que la pendiente de la lámina de agua equivale a la pendiente del conducto; es decir que  $I_0 = I_f$  (solamente intervienen las componentes de gravedad y fricción).

El máximo flujo que puede ser evacuado a través del conducto es el caudal a sección llena que se calcula por medio de la fórmula de Manning. Excepto si el conducto entra en carga, en cuyo caso el caudal sería mayor. Cualquier exceso de caudal en el nodo de entrada al conducto será perdido por el sistema, saliendo a la calle, o bien podrá acumularse sobre el nodo de entrada y ser reintroducido al conducto cuando haya capacidad disponible en este.

La onda cinemática permite variar temporalmente y espacialmente al caudal y la sección de flujo en un conducto. Esto puede resultar en hidrogramas de salida atenuados y retrasados a medida que los caudales de entrada van siendo modelados a lo largo del conducto, pero esa laminación solamente es numérica. Además, este método de cálculo no es capaz de tener en cuenta las condiciones de contorno aguas abajo, pérdidas en entradas y salidas, resaltos hidráulicos o el flujo inverso, y sigue estando limitado a nodos de red con una única salida. Por lo tanto no puede utilizarse en caso de existir en la red elementos de regulación o en redes malladas. Mantiene, de manera habitual, cierta estabilidad con intervalos de tiempo moderadamente elevados; del orden de 1 a 5 minutos. Si no se espera que los efectos en la red mencionados anteriormente sean significantes, y cuando la pendiente de la red en general es muy elevada presentando flujos supercríticos, este puede ser un método lo suficientemente preciso, especialmente para tiempos de simulación largos.

### Onda dinámica

El cálculo por onda dinámica resuelve las ecuaciones de Saint Venant unidimensionales (intervienen todas las fuerzas actuantes: gravedad, fricción, presión e inercia) y por lo tanto proporciona los resultados más precisos de los tres métodos propuestos. SWMM5 resuelve el sistema de ecuaciones mediante un esquema de diferencias finitas explícitas que utiliza intervalos de tiempo reducidos con objetivo de asegurar la estabilidad de la solución. Para que el proceso de cálculo sea más rápido, SWMM5 resuelve de manera simultánea la altura de la lámina libre solamente en los nodos de la red y el valor del caudal solamente en los conductos. Este método de cálculo permite representar el flujo a presión cuando se alcanza en un conducto el caudal a tubo lleno. Cuando la altura de la lámina de agua en un pozo de registro excede la altura máxima de este, el flujo de agua desborda y produce inundación.

La onda dinámica tiene en cuenta almacenamiento en conductos, efectos de remanso, pérdidas en entradas y salidas de la red, flujo inverso y entradas en carga. Puede aplicarse a cualquier esquema de red de drenaje, tanto en redes malladas como arborescentes. Este es el método adecuado para sistemas sujetos a efectos de remanso a causa de restricciones aguas abajo y con



elementos de regulación de caudales como orificios o vertederos. La contrapartida reside en que los intervalos de tiempo deberán ser considerablemente más reducidos, del orden de 30 segundos o menos.

Otro importante inconveniente del uso de la onda dinámica son las inestabilidades de cálculo que aparecen con escenarios de flujo complejos. Como solución a estos obstáculos al cálculo SWMM5 ofrece la posibilidad de simplificar los términos inerciales, que acostumbran a ser los más problemáticos en términos de inestabilidad numérica de la solución. SWMM5 permite ponderarlos de manera que se reduzca su importancia en zonas conflictivas o directamente ignorarlos utilizando una aproximación de onda difusiva (en la que intervienen fuerzas de gravedad, fricción y presión hidrostática).

#### **5.2.2.1. Elección del método de cálculo en el caso de estudio**

El objetivo del estudio que se lleva a cabo en este trabajo es, entre otros, el de analizar la capacidad de los LID para atenuar los efectos de las inundaciones. Asumiendo que, en su estado actual, el sistema de drenaje pluvial de la cuenca de estudio no es capaz de evacuar la lluvia de 10 años de periodo de retorno, los colectores entrarán en carga y el agua saldrá a la superficie. Por ello resulta básico que el cálculo realizado por SWMM5 en los conductos y nodos de la red de drenaje tenga en cuenta el posible flujo presurizado en los colectores y que se contabilice el agua de inundación en los nodos. Como se ha mencionado anteriormente, el único método de los que SWMM5 ofrece que permite calcular estos dos procesos es la onda dinámica; por este motivo será el que se utilizará para este caso de estudio.

El uso de intervalos de tiempo más reducidos no tendrá consecuencias relevantes en este estudio por el reducido tamaño de la cuenca y la sencillez de la red; el tiempo de cálculo será, aun así, muy pequeño. Se ha permitido el uso de intervalos de tiempo variables; para cada instante de tiempo se calcula un intervalo de tiempo para el cálculo por diferencias finitas que satisfaga la condición de Courant en cada conducto. Se ha utilizado un factor de ajuste del 75%, que es el recomendado por SWMM5. El mínimo intervalo de tiempo se ha fijado en 0,5 segundos y el máximo intervalo en 5 segundos. Del mismo modo, al no existir elementos de regulación del flujo ni situaciones complejas en la circulación del agua a través de los colectores, se mantendrán los términos inerciales. Al realizarse el cálculo más completo posible se obtendrán resultados más precisos que si se hubiera hecho uso de las simplificaciones.

SWMM5 determina cuando ocurre el flujo supercrítico a partir de la pendiente, del número de Froude o a partir de los dos anteriores. El usuario deberá escoger cuál es el criterio; en este caso se ha optado por utilizar tanto el número de Froude como la pendiente del colector. A la hora de calcular las pérdidas de carga lineales que se producen por fricción durante el flujo bajo presión en los conductos, el usuario deberá escoger si se utiliza la fórmula de Hazen-Williams o la de Darcy-Weisbach. En este caso se ha optado por la fórmula de Hazen-Williams. El resto de inputs que solicita SWMM5 para el cálculo por onda dinámica se muestran en la imagen a continuación:

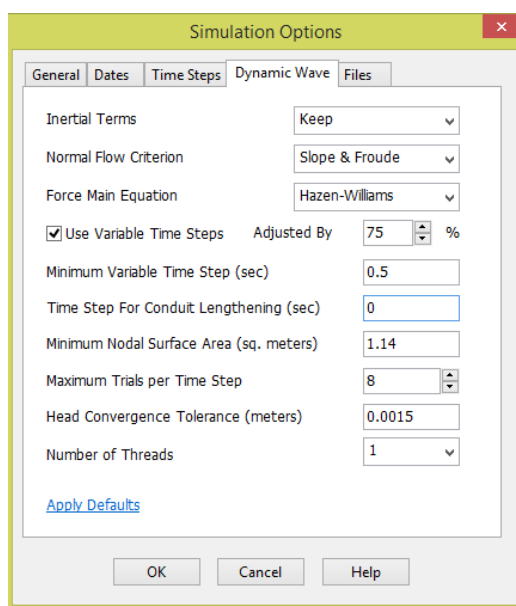


Figura 49: Opciones de cálculo solicitadas por SWMM5 para el cálculo según el método de onda dinámica.

### 5.2.3. Cálculo de la calidad del agua

La cantidad de sedimentos y contaminantes que se acumulan en la superficie de una sub-cuenca es una función de los días secos previos al evento de lluvia. La función utilizada para representar esta acumulación depende también de la frecuencia y técnicas de limpieza de dichas superficies, intensidad de tráfico y las características de las superficies (usos del suelo y permeabilidad). La acumulación en SWMM5 se puede describir mediante funciones exponenciales, potenciales o relaciones de saturación. También es posible introducir una cantidad inicial de sedimento distribuida uniformemente sobre la superficie.

El lavado de contaminantes de las superficies es un proceso más complejo, ligado a las características de la lluvia, de los sedimentos y las propias superficies. SWMM5 modeliza este proceso mediante un modelo conceptual simplificado. Este considera los procesos de erosión producidos por la escorrentía sobre la superficie. Las relaciones de lavado propuestas por SWMM5 son: relaciones exponenciales (el lavado es función de la escorrentía y de la masa de contaminante restante en la superficie), el método “rating curve” (el lavado es función solamente de la escorrentía) y concentraciones constantes de contaminante.

Para la modelización de la calidad del agua de escorrentía que se evacúa por medio de los colectores de la red de drenaje se asume que los conductos se comportan como un reactor continuo de tanque agitado (RCTA). Una hipótesis de reactor en flujo pistón (RFP) resultaría más realista, aunque las diferencias serán mínimas si el tiempo de transporte a través del conducto es del mismo orden que el intervalo de tiempo utilizado en el cálculo hidráulico. La concentración de un contaminante en el conducto al final de un intervalo de tiempo se encuentra por medio de la integración de la ecuación de la conservación de la masa, utilizando valores medios para las cantidades, que pueden cambiar a lo largo del intervalo de tiempo al igual que el caudal o el volumen de agua.

Se debe tener en cuenta también que aunque las técnicas LID aportan significativos beneficios en cuanto a la reducción de contaminantes, a día de hoy, SWMM5 solamente modela la reducción de contaminantes en masa debida a la propia reducción en el volumen de escorrentía.

### 5.2.3.1. Calidad del agua en el caso de estudio

Los contaminantes que se van a monitorizar en el proceso de simulación de la calidad del agua mediante SWMM5 son los que utiliza Seco & Gómez (2014) en su modelo SWMM5, en el que se basa el utilizado en este trabajo. Seco & Gómez (2014) calibró el modelo para esta misma cuenca del centro de Granollers en su estudio sobre el transporte de sedimentos en colectores de redes de alcantarillado, de manera que se considera que la modelización que propone es la más adecuada para simular la calidad del agua en este caso de estudio.

Por lo tanto, los contaminantes que se introducen en el modelo para su seguimiento son Sólidos Totales en Suspensión (SS), Demanda Bioquímica de Oxígeno a los 5 días (DBO5) y amonio (NH4). Para definir sus propiedades se deberá acudir al menú de la pantalla principal de SWMM5 y entrar en la categoría “Quality - Pollutants”. Para los SS se define una concentración de 7 mg/L en agua de lluvia y de 200 mg/L en flujo sanitario de clima seco; para la DBO5 se define una concentración de 240 mg/L en flujo sanitario de clima seco y que un 85% de la concentración de SS en la escorrentía sería de DBO5; y para el NH4 se define una concentración de 0,55 mg/L en agua de lluvia, de 40mg/L en flujo sanitario de clima seco y que un 3% de la concentración de SS en la concentración sería de NH4. Estos porcentajes fueron obtenidos del análisis de muestras de agua en el colector durante los eventos de lluvia. Al no aportar valores a las concentraciones del subsuelo y de flujos de infiltración de aguas subterráneas, se está considerando que los contaminantes provienen exclusivamente de la superficie por deposición previa y por arrastre en la precipitación.

Para definir la concentración inicial de los contaminantes se puede aportar directamente un valor para cada uno de ellos o especificar un número de días sin lluvia previos a la simulación. Esta segunda opción será por la que se ha optado, imponiendo un total de 29 días secos antes del evento propio del caso de estudio.

Los procesos de acumulación y de lavado de sedimentos y contaminantes se definen mediante la especificación de los usos del suelo en cada sub-cuenca. Dado que la totalidad de la cuenca se encuentra en una zona residencial se ha utilizado solamente un uso del suelo. Se considera que la última limpieza de la calle se realizó 13 días antes de la simulación y que esta limpieza afecta a un 40% de la superficie.

El proceso por el que optan Seco & Gómez (2014) para la acumulación de SS en superficie es el potencial, que se basa en la siguiente expresión:

$$B = \text{Min}(C_1, C_2 t^{C_3})$$

*Ecuación 18*

Donde  $C_1$  es la máxima acumulación posible (60 kg/ha),  $C_2$  es el ratio constante de acumulación (21 kg/ha·día) y  $C_3$  es el exponente temporal (0,25 días). Durante los días secos, la DBO5 y el

NH4 se acumulan según la fracción de SS que se ha definido previamente (85% y 3% respectivamente), luego no será necesario establecer una función de acumulación para ellos.

El proceso por el que optan Seco & Gómez (2014) para el lavado de SS por escurrimiento de agua pluvial es el exponencial, que se basa en la siguiente expresión:

$$W = C_1 q^{C_2} B$$

*Ecuación 19*

Donde  $C_1$  es el coeficiente de lavado (0,2),  $q$  es el caudal de escurrimiento por unidad de área en cada sub-cuenca para cada instante de tiempo (en mm/h·ha),  $C_2$  es el exponente de lavado (1,4) y  $B$  es la masa total de contaminante acumulado en cada sub-cuenca para cada instante de tiempo (en mg). Se establece también una eficiencia de eliminación del contaminante del 20%. Como para la función de acumulación, solamente se define para los SS.

### 5.3. Simulación de las técnicas LID con SWMM5

Las últimas versiones de SWMM5 están incorporando la posibilidad de modelizar diferentes tipos de técnicas LID. Estas simulan los procesos de retención, infiltración, evapotranspiración y reducción de la carga contaminante en la medida que las diferentes capas que las componen son capaces de llevarlos a cabo. En este trabajo, la herramienta de modelización de técnicas LID que ofrece SWMM5 ayudará a clarificar las posibilidades de aplicación del drenaje urbano sostenible en localidades mediterráneas.

Las técnicas LID se representan como una combinación de capas verticales cuyas propiedades se definen por unidad de área. Esto permite aplicar LIDs de la misma tipología y características pero de diferente área en diferentes sub-cuencas. Durante la simulación, SWMM5 lleva a cabo un balance de humedad que monitoriza cuánta agua se mueve entre capas y cuánta agua es almacenada en cada una de ellas para cada intervalo de tiempo. Desde el menú de la pantalla principal de SWMM5, seleccionando la opción “Hydrology – LID Controls”, podemos crear o editar las diferentes técnicas LID que se van a utilizar en el proyecto. Posteriormente, en la ventana de características de cada sub-cuenca, se podrá especificar qué área ocupa cada técnica en cada sub-cuenca mediante los “LID Group Editor” y “LID Usage Editor”. En este capítulo se detalla cómo llevar a cabo cada uno de estos pasos.

Existen dos métodos diferentes para ubicar las técnicas LID en una sub-cuenca:

- Situar un LID o más de uno en una sub-cuenca existente, lo que hará que la proporción de área no cubierta por LID disminuya.
- Crear una sub-cuenca adicional específicamente para albergar el LID que se desee implementar.

El primer método permite situar un conjunto de diferentes técnicas LID en una misma sub-cuenca, cada una tratando una porción diferente de la escurrimiento. Utilizando esta opción se consigue que los diferentes LID actúen en paralelo; no es posible hacerlos actuar en serie, es decir, hacer que el caudal de salida de un LID sea el de entrada en el siguiente. Además, el

porcentaje de área impermeable y el parámetro de ancho de la sub-cuenca deberán ser ajustados para compensar el área que ha sido ocupada por LIDs; este fenómeno se ilustra en la figura a continuación:

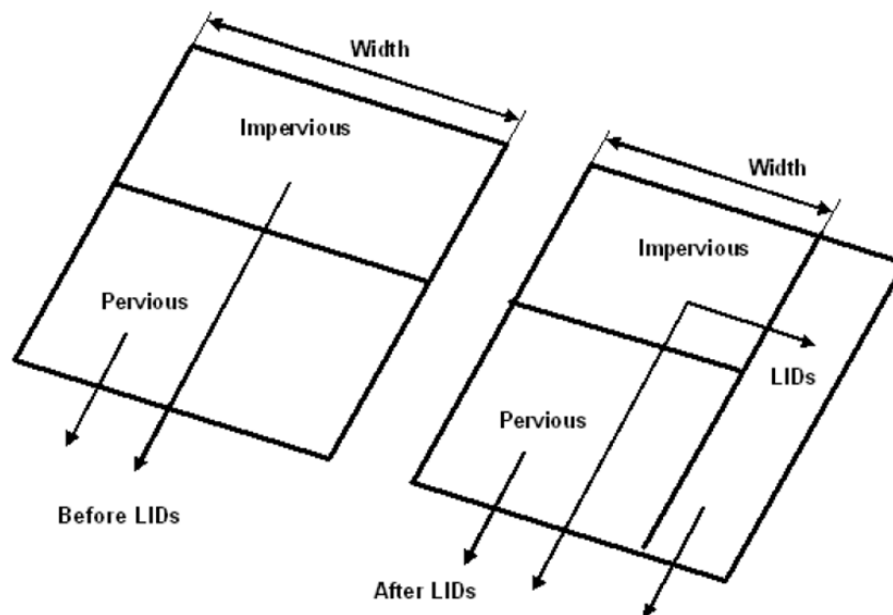


Figura 50: Ajuste de los parámetros de porcentaje de área impermeable y ancho después de ubicar un LID en una sub-cuenca. Fuente: SWMM User's Manual Version 5.1.

Utilizando este método, los diferentes LIDs implementados en una misma sub-cuenca tratarán tanto el área que cae sobre ellos como la parte de escorrentía generada en la porción impermeable de la sub-cuenca que se dirccione hacia ellos.

El segundo método permite que los LID funcionen en serie, así como derivar la escorrentía generada en una sub-cuenca hacia un LID en concreto. Si las nuevas sub-cuencas que albergan los LID ocupan el área antes perteneciente a una de las sub-cuencas originales, se deberán realizar también los ajustes necesarios en los parámetros de ancho, porción impermeable y área de dicha sub-cuenca. Se debe tener en cuenta también que los parámetros que pertenecen al elemento LID tendrán siempre prioridad ante los parámetros standard a definir en una nueva sub-cuenca; por ello, se pueden obviar estos últimos.

El flujo de salida de los elementos LID, se deriva por defecto al mismo nodo de conexión con la red de alcantarillado que la sub-cuenca de la que forman parte; se considera flujo de salida tanto el flujo por desborde en superficie como el caudal que evacúa un posible dren situado en una de las capas que lo forman. Sin embargo, el usuario puede escoger devolver todo el caudal de salida del LID a las áreas permeables de la sub-cuenca.

### 5.3.1. Tipología

Ya se han desarrollado a lo largo de los capítulos anteriores las características y propiedades de las técnicas de drenaje urbano sostenible. Una posible clasificación de los LID se ha presentado en la sección 2.5.2. *Medidas estructurales*; por otra parte, SWMM5 ofrece 8 tipos de técnicas LID para aplicar en los proyectos:

#### 5.3.1.1. Celdas de bio-retención (“Bio-retention Cells”)

SWMM5 nos permite modelizar un tipo de sistema de bio-retención al que llama celda de bio-retención. Estas consisten en áreas deprimidas que contienen vegetación plantada en una mezcla de suelos con propiedades concretas, sobre una cama de gravas drenantes. Proporcionan espacio para almacenar escorrentía, permiten infiltrar agua en el terreno natural sobre el que se encuentran y evapotranspirar, tanto la escorrentía captada de las áreas adyacentes que drenan hacia ellas como el agua de lluvia que cae directamente sobre su superficie.

La esquematización por medio de capas que hace SWMM5 de este tipo de técnica LID es la siguiente:

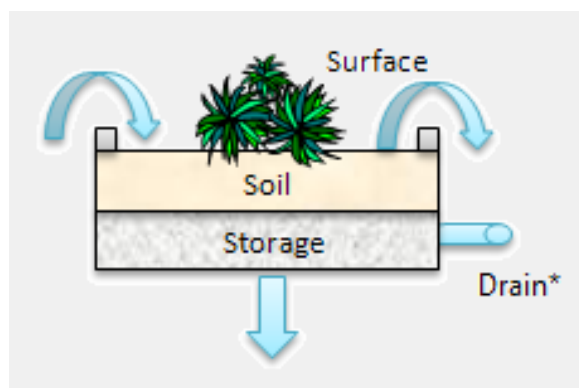


Figura 51: Esquema de la modelización de las celdas de bio-retención por parte de SWMM5.

Por lo tanto, las capas de que dispone una celda de bio-retención en SWMM5 son: superficie, suelo y almacenamiento. Tal y como representan las flechas de color azul de la ilustración anterior, el agua entra por superficie (ya sea en forma de escorrentía o de precipitación) y puede salir por superficie, infiltrándose en el terreno o directamente hacia la red de alcantarillado a través de un dren (este último es opcional).

#### 5.3.1.2. Jardines de lluvia (“Rain Gardens”)

Como ya se comentó en la sección 3.5.2. *Medidas estructurales*, los jardines de lluvia son otro tipo de sistema de bio-retención. Estos, a la hora de ser modelizados en SWMM5, resultan idénticos a las celdas de bio-retención con la diferencia de que no cuentan con capa de almacenamiento (y por extensión tampoco cuentan con el dren opcional). Los procesos que se



llevan a cabo en sus capas son los mismos que para las celdas de bio-retención pero, por razones obvias, su capacidad para almacenar escorrentía será mucho menor.

La esquematización por medio de capas que hace SWMM5 de este tipo de técnica LID es la siguiente:

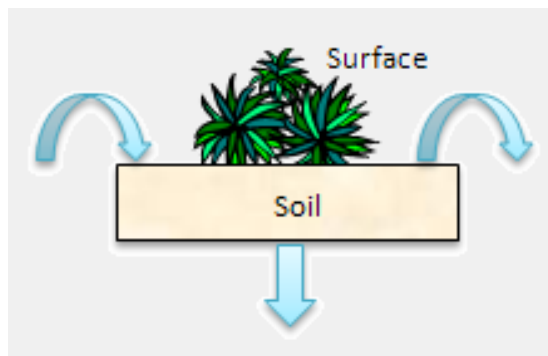


Figura 52: Esquema de la modelización de los jardines de lluvia por parte de SWMM5.

Por lo tanto, las capas de que dispone un jardín de lluvia en SWMM5 son: superficie y suelo. Tal y como representan las flechas de color azul de la ilustración anterior, el agua entra por superficie (ya sea en forma de escorrentía o de precipitación) y puede salir por superficie o infiltrándose en el terreno únicamente.

#### 5.3.1.3. *Tejados verdes ("Green Roofs")*

Los tejados verdes son aquellos que permiten plantar vegetación en una capa de suelos con características concretas, que se sitúa sobre una capa drenante de un material capaz de retener el agua de lluvia que cae sobre el tejado. Estos permiten, por lo tanto, almacenar in-situ el agua de lluvia y transportarla directamente hacia la red de alcantarillado o hacia las áreas permeables circundantes.

La esquematización por medio de capas que hace SWMM5 de este tipo de técnica LID es la siguiente:

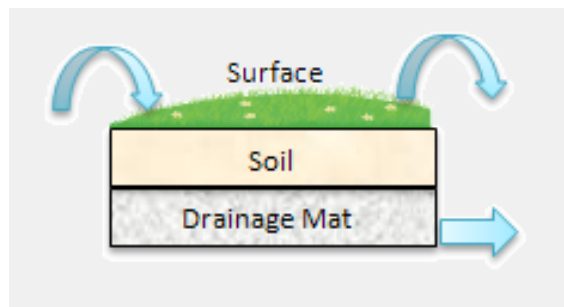


Figura 53: Esquema de la modelización de los tejados verdes por parte de SWMM5.

Por lo tanto, las capas de que dispone un tejado verde en SWMM5 son: superficie, suelo y capa drenante. Tal y como representan las flechas de color azul de la ilustración anterior, el agua entra por superficie (ya sea en forma de escorrentía o de precipitación) y puede salir por superficie o a través de la capa drenante hacia la red de alcantarillado o áreas permeables.

#### 5.3.1.4. Zanjas de infiltración (*"Infiltration Trenches"*)

SWMM5 denomina zanjas de infiltración a cualquier tipo de sistema de infiltración, ya que al poder decidir el espacio en superficie que ocupa la zanja y su profundidad, la zanja es fácilmente convertible en un pozo o depósito de infiltración. Recordemos que este tipo de LID consiste en una excavación rellena de grava drenante que retiene la escorrentía que llega a esta y el agua de lluvia que cae sobre ella. Proporcionan espacio de almacenamiento y tiempo para que parte de la escorrentía sea infiltrada hacia el terreno natural.

La esquematización por medio de capas que hace SWMM5 de este tipo de técnica LID es la siguiente:

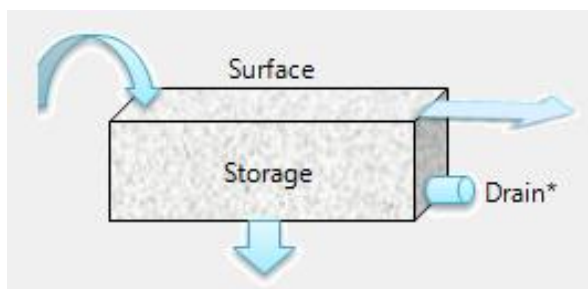


Figura 54: Esquema de la modelización de las zanjas de infiltración por parte de SWMM5.

Por lo tanto, las capas de que dispone una zanja de infiltración en SWMM5 son: superficie y almacenamiento. Tal y como representan las flechas de color azul de la ilustración anterior, el agua entra por superficie (ya sea en forma de escorrentía o de precipitación) y puede salir por superficie, infiltrándose en el terreno o directamente hacia la red de alcantarillado a través de un dren (este último es opcional).

#### 5.3.1.5. Pavimento permeable (“Permeable pavement”)

Los pavimentos permeables, en SWMM5, consisten en áreas excavadas, rellenas de grava drenante y pavimentadas con un hormigón o mezcla bituminosa porosos. Puede existir una capa de arena entre la grava y la capa de rodadura. Normalmente la lluvia percolará rápidamente a través de la capa de pavimento hacia la capa de almacenamiento, donde podrá infiltrarse hacia el terreno, a la capacidad que éste permita. Los pavimentos permeables por medio de bloques también pueden ser modelizados en SWMM5 si se conocen los parámetros asociados a sus diferentes capas.

La esquematización por medio de capas que hace SWMM5 de este tipo de técnica LID es la siguiente:

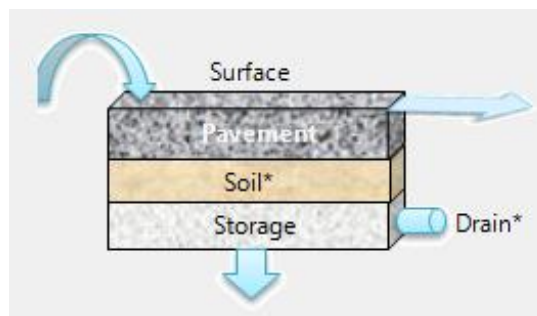


Figura 55: Esquema de la modelización de los pavimentos permeables por parte de SWMM5.

Por lo tanto, las capas de que dispone un pavimento permeable en SWMM5 son: superficie, suelo (en el caso de algunos tipos de pavimentos de bloques) y almacenamiento. Tal y como representan las flechas de color azul de la ilustración anterior, el agua entra por superficie (ya sea en forma de escorrentía o de precipitación) y puede salir por superficie (en caso de saturación de las capas), infiltrándose en el terreno o directamente hacia la red de alcantarillado a través de un dren (este último es opcional).

#### 5.3.1.6. Rain Barrels

SWMM5 modeliza los Rain Barrels como contenedores que recogen escorrentía durante los eventos de lluvia y que la liberan o la almacenan para su reutilización durante los periodos secos. Estos permiten, por lo tanto, almacenar in-situ el agua de lluvia y transportarla directamente hacia la red de alcantarillado o hacia las áreas permeables circundantes (si así se desea). Son elementos puntuales que, por ejemplo, se pueden aplicar a nivel de una casa.

La esquematización por medio de capas que hace SWMM5 de este tipo de técnica LID es la siguiente:

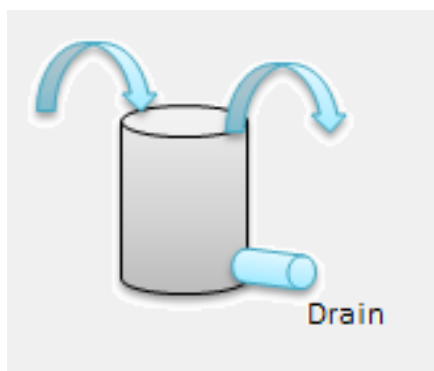


Figura 56: Esquema de la modelización de los rain barrels por parte de SWMM5.

Por lo tanto, la única capa de que dispone un rain barrel en SWMM5 es la de almacenamiento. Tal y como representan las flechas de color azul de la ilustración anterior, el agua entra por superficie (ya sea en forma de escorrentía o de precipitación) y puede salir por superficie (en caso de llenarse el rain barrel), o directamente hacia la red de alcantarillado o áreas permeables.

#### 5.3.1.7. Desconexión de bajantes de tejados ("Rooftop Disconnection")

SWMM5 considera a la conexión de las bajantes de los tejados a áreas permeables como una técnica LID. Su función es la de permitir que la escorrentía generada en los tejados se pueda infiltrar en el terreno natural, cosa que de otro modo no es posible si la bajante de pluviales del edificio se conecta directamente a la red de colectores.

La esquematización por medio de capas que hace SWMM5 de este tipo de técnica LID es la siguiente:

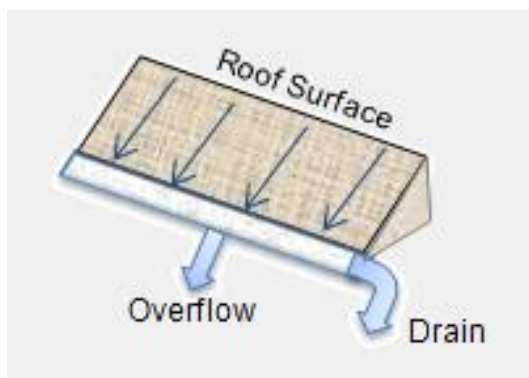


Figura 57: Esquema de la modelización de las desconexiones de bajantes pluviales por parte de SWMM5.

Por lo tanto, la única capa de que dispone la desconexión de bajantes en SWMM5 es la de superficie. Tal y como representan las flechas de color azul de la ilustración anterior, el agua entra en forma de escorrentía y puede salir por medio de la propia bajante o por rebose de los canalones (en ambos casos hacia áreas permeables).

#### 5.3.1.8. Cunetas verdes (“Vegetative Swales”)

Las cunetas verdes son consideradas en SWMM5 como canales o áreas deprimidas con pendiente longitudinal cubiertas de vegetación. Estas permiten ralentizar el transporte de la escorrentía y proporcionan tiempo adicional para que esta pueda infiltrarse en el terreno natural. Proporcionan espacio para almacenar escorrentía, permiten infiltrar agua en el terreno natural sobre el que se encuentran y evapotranspirar, tanto la escorrentía captada de las áreas adyacentes que drenan hacia ellas como el agua de lluvia que cae directamente sobre su superficie.

La esquematización por medio de capas que hace SWMM5 de este tipo de técnica LID es la siguiente:

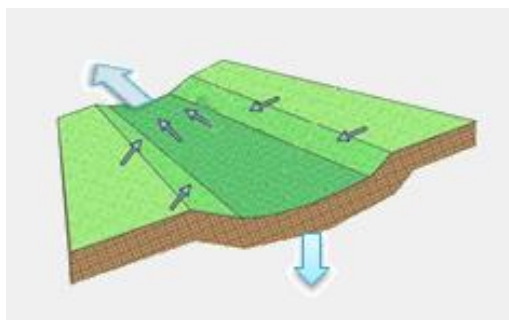


Figura 58: Esquema de la modelización de las desconexiones de bajantes pluviales por parte de SWMM5.

Por lo tanto, la única capa de que disponen las cunetas verdes en SWMM5 es la de superficie. Tal y como representan las flechas de color azul de la ilustración anterior, el agua entra por superficie (ya sea en forma de escorrentía o de precipitación) y puede salir por superficie (en caso de rebose) o infiltrándose en el terreno.

#### 5.3.2. Características de las capas y sus parámetros

La ventana “LID Control Editor” es la que permite crear un elemento LID y modificar sus características. Se deberá dar un nombre a la técnica LID y escoger una de las 8 tipologías presentadas anteriormente. A continuación, se deberán definir las propiedades de cada una de las capas que conforman ese tipo de LID en concreto. Cada capa consta de varios parámetros que condicionarán su comportamiento. En esta sección se va a detallar qué parámetros

deberemos insertar para cada una de las capas que se pueden encontrar en los diferentes LID que ofrece SWMM5 (incluida la tubería de drenaje opcional en algunos de los LID).

#### 5.3.2.1. Capa de superficie (“Surface Layer”)

La capa de superficie se utiliza para describir las propiedades de la superficie de los diferentes tipos de LID. Todos los LID, a excepción del Rain Barrel, disponen de esta capa. Los diferentes parámetros a introducir para esta capa son:

- **Altura de berma:** Cuando existan bermas o muros de confinamiento, ésta será la altura hasta la cual el agua puede almacenarse en superficie antes de desbordar (en mm). Para las desconexiones de bajantes de pluviales, ésta será la altura de agua que se puede retener en las posibles depresiones del tejado. Para las cunetas verdes, esta será la altura de la sección transversal trapezoidal de la cuneta.
- **Volumen de vegetación:** Es la fracción del volumen de almacenamiento del LID que se encuentra rellena de vegetación. Es decir, el volumen que ocupan dentro de la capa de suelo las raíces y hojas, no la superficie de cobertura vegetal. Normalmente es un parámetro que puede ser ignorado pero en ocasiones puede alcanzar valores de hasta 0,1 o 0,2 para vegetaciones muy densas.
- **Rugosidad de la superficie:** Es el número de Manning “*n*” para flujo en superficie. Tendrá sentido únicamente cuando circule escorrentía sobre la superficie del LID; por lo tanto este parámetro solamente se utiliza para pavimentos, superficies de tejados y cunetas verdes.
- **Pendiente de la superficie:** Tendrá sentido únicamente cuando circule escorrentía sobre la superficie del LID; por lo tanto este parámetro solamente se utiliza para pavimentos, superficies de tejados y cunetas verdes.

#### 5.3.2.2. Capa de pavimento (“Pavement Layer”)

La capa de pavimento aparece exclusivamente cuando se crea un pavimento permeable. Para definirla correctamente, se deberán introducir los siguientes parámetros:

- **Espesor (E):** Espesor de la capa de rodadura (en mm). Se trata de la altura que tendrá la capa de mezcla bituminosa, hormigón o los bloques que se utilicen en el pavimento permeable. El valor para este parámetro recomendado en el “*SWMM Model User’s Manual*” es de 100 a 150 mm.
- **Relación de huecos:** El volumen de espacio vacío relativo al volumen de sólidos en el pavimento, en el caso de sistemas continuos, o en el material de relleno de los espacios entre bloques, en el caso de pavimentos de bloques (como ratio). El valor para este parámetro recomendado en el “*SWMM Model User’s Manual*” es de 0,12 a 0,2 para asfaltos y hormigones permeables. Para definir este parámetro puede resultar útil



recordar que la relación entre la porosidad del material " $\eta$ " y la relación de huecos " $e$ " es:

$$\eta = \frac{e}{1+e} \quad \text{Ecuación 20}$$

Por lo tanto, si se utilizan pavimentos modulares con arena como material de relleno de juntas, según los valores de porosidad proporcionados por el "*SWMM Model User's Manual*", la relación de huecos a utilizar es alrededor de 0,78.

- Fracción de superficie impermeable (FSI): Se trata del ratio del área cubierta por material impermeable con respecto al área total de pavimento. Este parámetro tiene sentido para los pavimentos modulares, donde rondará el 80%; tendrá el valor de cero para los sistemas de pavimento poroso continuo.
- Permeabilidad: Permeabilidad del pavimento bituminoso u hormigón poroso que se utilice o del material de relleno entre bloques para pavimentos modulares (en mm/h). La permeabilidad de asfaltos y hormigones porosos suele ser muy elevada pero puede verse reducida drásticamente con el tiempo debido a la colmatación de los poros. Para pavimentos modulares Karasawa & Suda (1996) proponen un rango entre 17000 y 25000 mm/h y para asfaltos porosos Rodríguez y otros (2006) proponen un rango entre 14000 y 22000 mm/h.
- Factor de colmatación: La colmatación se estima de manera que reduce la permeabilidad del pavimento de manera directamente proporcional al volumen de escorrentía total tratada.

Si  $Y_{clog}$  es una estimación del número de años que tarda el pavimento en colmatarse totalmente,  $Pa$  el volumen de lluvia anual sobre la cuenca de estudio,  $A_T$  el área tributaria al pavimento y  $A_P$  el área del propio pavimento, el factor de colmatación (FC) puede calcularse como:

$$FC = \frac{Y_{clog} * Pa * \frac{A_T}{A_P} * (1+e) * (1+FSI)}{(E*e)} \quad \text{Ecuación 21}$$

Tendrá un valor de 0 si se desea menospreciar el fenómeno de colmatación.

### 5.3.2.3. Capa de suelo ("Soil Layer")

La capa de suelo describe las propiedades de la mezcla de suelos que se utiliza en los LID de tipo sistema de bio-retención y tejados verdes. También se encuentra como capa auxiliar bajo la capa de pavimento de los pavimentos porosos. Los diferentes parámetros que se deberán introducir son los siguientes:

- Espesor: Espesor de la capa de suelos (en mm). El valor para este parámetro recomendado en el “*SWMM Model User’s Manual*” es de 450 a 900 mm para los sistemas de bio-retención, pero solamente entre 75 y 150 mm para los tejados verdes.
- Porosidad: Volumen de huecos relativo al volumen total de sólidos (como ratio).
- Capacidad de campo: Volumen de agua en los poros relativo al volumen total del material una vez se ha dejado drenar totalmente (como ratio). Por debajo de este nivel, no sucede ningún drenaje vertical de agua a través de la capa de suelo.
- Punto de marchitez: Volumen de agua en los poros relativo al volumen total de material una vez este ha sido bien secado y solamente resta el agua adherida a los granos (como ratio). El contenido de humedad del suelo no puede bajar de este valor.
- Conductividad: Se trata de la conductividad hidráulica (permeabilidad) del suelo completamente saturado (mm/h).
- Pendiente de conductividad: Pendiente de la curva que tiene por abscisas la conductividad en escala logarítmica y por ordenadas el contenido de humedad del suelo (adimensional). Los valores típicos según el “*SWMM Model User’s Manual*” oscilan entre 30 y 60. Este parámetro puede ser estimado a partir de un análisis del tamaño de grano de la siguiente manera:  $0,48 * (\% \text{ Arena}) + 0,85 * (\% \text{ Arcilla})$ .
- Altura de succión: Se trata del valor habitual para la succión capilar a lo largo del frente mojado (en mm). Es el mismo parámetro que se utiliza en el modelo de infiltración Green-Ampt.

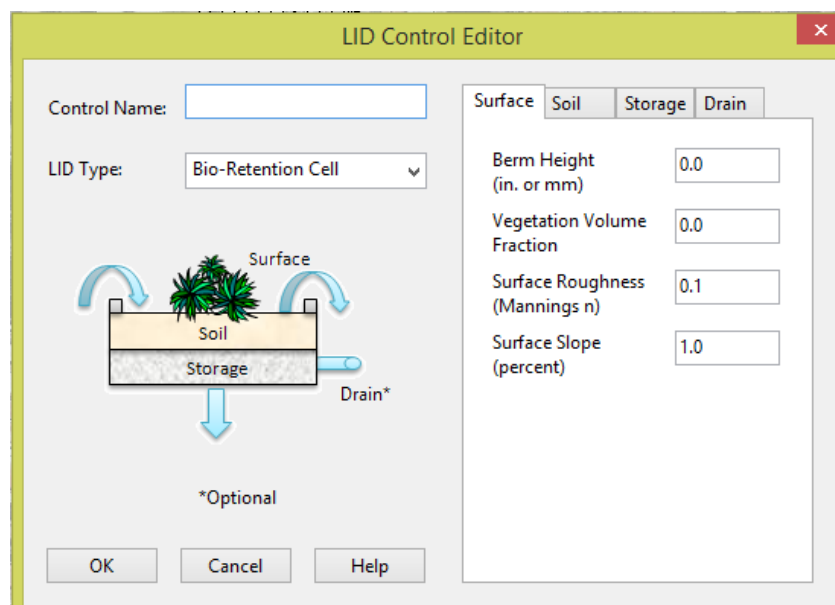


Figura 59: Ventana “LID Control Editor” en SWMM5.

#### 5.3.2.4. Capa de almacenamiento ("Storage Layer")

Los parámetros de la capa de almacenamiento describen las propiedades de la capa de grava drenante utilizada en sistemas de bio-retención, pavimentos permeables y zanjas de infiltración como capa de fondo. También se utiliza para especificar la altura de los rain barrels. Estos son los siguientes:

- **Espesor:** Es la altura de la capa de grava o la altura del rain barrel (en mm). Las capas de grava acostumbran a ser del orden de 150 a 450 mm según el "*SWMM Model User's Manual*", mientras que los rain barrels más comunes en hogares unifamiliares tienen una altura entre 600 y 900 mm.
- **Relación de huecos:** El volumen de espacio vacío relativo al volumen de sólidos en la capa. El valor para este parámetro recomendado en el "*SWMM Model User's Manual*" es de 0,5 a 0,75.
- **Capacidad de infiltración:** Velocidad a la que el agua infiltra en el terreno natural bajo la capa de almacenamiento en el caso de que no exista ninguna capa impermeable que lo impida (mm/h). Habitualmente será la conductividad hidráulica del suelo de la zona.
- **Factor de colmatación:** Volumen total de escorrentía tratada que se necesita para colmatar completamente el fondo de la capa dividido entre el volumen total de vacíos de la capa. Tendrá un valor de 0 si se desea menospreciar el fenómeno de colmatación.

#### 5.3.2.5. Dren de la capa de almacenamiento ("Storage Drain")

Las capas de almacenamiento de algunos de los LID pueden contener una tubería de drenaje que recolecta el agua que entra a la capa y la dirige hacia la red de alcantarillado o algún otro destino especificado por el usuario (que puede diferir de la salida a la red de drenaje de la sub-cuenca). Para las desconexiones de bajantes pluviales, el dren se corresponde con la propia bajante. Los parámetros a introducir para definir las propiedades del dren son los siguientes:

- **Coeficiente ( $C$ ) y exponente ( $n$ ) de dren:** Estos determinan el flujo por unidad de área en función de la altura de agua almacenada en la capa de almacenamiento por encima de la tubería ( $h$ ).

$$q = C h^n \quad \text{Ecuación 22}$$

Esta relación proviene del Teorema de Torricelli sobre el flujo de un líquido contenido en un recipiente, a través de un pequeño orificio:

$$q = \frac{Q}{A} = C_d \sqrt{2gh} = C_d \sqrt{2g} \cdot h^{0,5} = C h^{0,5} \quad \text{Ecuación 23}$$

Dónde  $Q$  es el caudal total que evacúa la tubería,  $A$  es el área de la sección transversal de esta,  $g$  la aceleración de la gravedad y  $C_d$  un coeficiente de descarga que tiene en cuenta la contracción de la vena fluida a la salida por el orificio y las pérdidas de velocidad en el proceso.

El “*SWMM Model User’s Manual*” propone valores de  $n$  cerca de 0,5 y suele ser habitual aproximar  $C_d$  con el valor de 0,6. Por lo tanto  $C = 0,6\sqrt{2g} \approx 2,65$ . Si no existe desagüe inferior, el valor de  $C$  es nulo. Si se quiere estimar el valor de  $C$  en función del tiempo necesario  $T$  para drenar una profundidad  $D$ , se puede utilizar la siguiente expresión:

$$C = \frac{2\sqrt{D}}{T} \quad \text{Ecuación 24}$$

Esta fórmula comúnmente se utiliza para determinar el coeficiente de dren de los rain barrels.

- Altura del dren: Es la altura por encima del fondo de la capa de almacenamiento a la que se encuentra el dren (en mm).
- Aplazamiento de liberación: El número de horas de clima seco que se debe esperar para liberar el agua almacenada en el rain barrel (asumiendo que la tubería de descarga del rain barrel se encuentra cerrada durante el evento de lluvia). Un valor de 0 significa que el dren del rain barrel se encuentra abierto en todo momento y drena continuamente. Este parámetro se ignora para cualquier otro tipo de LID.
- Capacidad de flujo: Es el máximo caudal que admiten las bajantes de pluviales de los edificios (mm/h) antes de desbordar. Este es el único parámetro de dren para las desconexiones de bajantes. El valor de 0 sirve para considerar que las bajantes admiten cualquier caudal.

#### 5.3.2.6. Capa drenante (“*Drainage Mat*”)

SWMM5 asocia esta capa drenante al material utilizado en los tejados verdes para retener los caudales de lluvia recolectada en origen que percolan a través de la capa de suelo. Se pueden utilizar gran variedad de materiales y formatos drenantes distintos para dicha función; para definir sus propiedades se utilizan los siguientes parámetros:

- Espesor: Es la altura de la capa o lámina utilizada (en mm). Según el “*SWMM Model User’s Manual*” los valores típicos de espesor para esta capa se encuentra entre 25 y 50 mm.
- Fracción de vacíos: El volumen de espacio vacío relativo al volumen total en la capa. El valor para este parámetro recomendado en el “*SWMM Model User’s Manual*” es de 0,5 a 0,6.

- Rugosidad: Es el número de Manning “*n*” utilizado para calcular el flujo horizontal de agua drenada a través de la capa. Los fabricantes no especifican habitualmente este valor, luego deberá ser estimado. El “*SWMM Model User’s Manual*” recomienda el uso de un factor relativamente alto, entre 0,1 y 0,4.

### 5.3.3. Aplicación de las técnicas LID en las sub-cuencas

Una vez los diferentes elementos LID que se desean implementar en el proyecto SWMM5 han sido creados y sus parámetros definidos se deberá decidir en qué medida van a actuar cada uno de ellos en las diferentes sub-cuencas del proyecto. Para ello existen las herramientas “LID Group Editor” y “LID Usage Editor”.

#### 5.3.3.1. “LID Group Editor”

Esta ventana aparecerá cuando la propiedad “LID Controls” de una sub-cuenca es seleccionada para su edición. Se utiliza para distinguir qué técnicas LID definidas anteriormente se han ubicado en la sub-cuenca, con qué tamaño y qué porcentaje de la escorrentía proveniente de la porción de área sin LID tratan cada uno de ellos.

En esta ventana se debe prestar atención a que tanto el % de Área como el % de área impermeable tratada, para cada uno de los LID que aparecen, no supere el 100%. Los parámetros que se muestran en esta ventana se definen en la ventana “LID Usage Editor”:

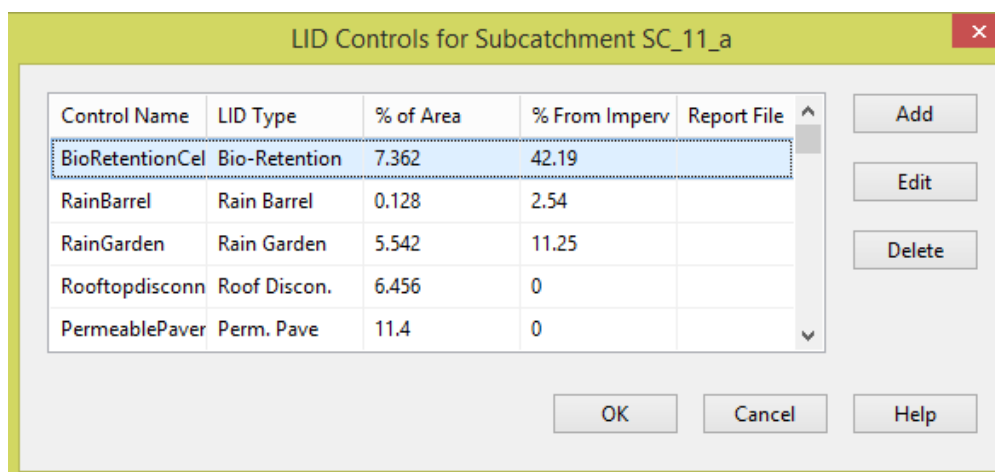


Figura 60: Ejemplo de ventana “LID Group Editor” para una de las sub-cuencas del caso de estudio.

#### 5.3.3.2. “LID Usage Editor”

En el momento en que se selecciona la opción de añadir o editar un nuevo LID para la sub-cuenca aparecerá la ventana de “LID Usage Editor”. Esta permite especificar cómo un determinado LID creado anteriormente va a ser utilizado en la sub-cuenca en cuestión. En esta ventana se pueden introducir los siguientes datos:

- Se deberá escoger el nombre de uno de los LIDs creados anteriormente.
- Se da la opción de seleccionar una casilla que otorga al LID el área total de la sub-cuenca.
- En caso de que el LID no ocupe el área de la sub-cuenca al completo se deberá especificar el área (en  $m^2$ ) que ocupa la tipología de LID en concreto dentro de la sub-cuenca.
- Si existe más de una unidad de la tipología de LID en la sub-cuenca, se deberá especificar el número concreto de ellas que se desea ubicar.
- Se deberá especificar el ancho de la cara por donde se da el flujo de salida del elemento LID. Este parámetro se aplica para tejados, pavimentos, zanjas y cunetas con pendiente que usan el flujo en superficie para evacuar la escorrentía fuera de la unidad LID. Para otros elementos LID este parámetro tendrá un valor de 0.
- El porcentaje de área impermeable de la sub-cuenca que va a tratar el LID. Si la unidad solamente actúa en origen, como en el caso de un tejado o una desconexión, el valor que se le dará al parámetro es 0.
- Se deberá proveer el nombre del nodo o sub-cuenca que recibirá el flujo de salida del LID. Se puede dejar en blanco en el caso de el objeto de destino es el mismo que el de la sub-cuenca donde se encuentra el LID.
- Existe la opción de marcar una casilla que permite mandar el flujo de salida de la unidad LID hacia las áreas permeables de la sub-cuenca donde este se encuentra. Esta práctica será habitual para rain barrels, tejados verdes y desconexiones de bajantes.

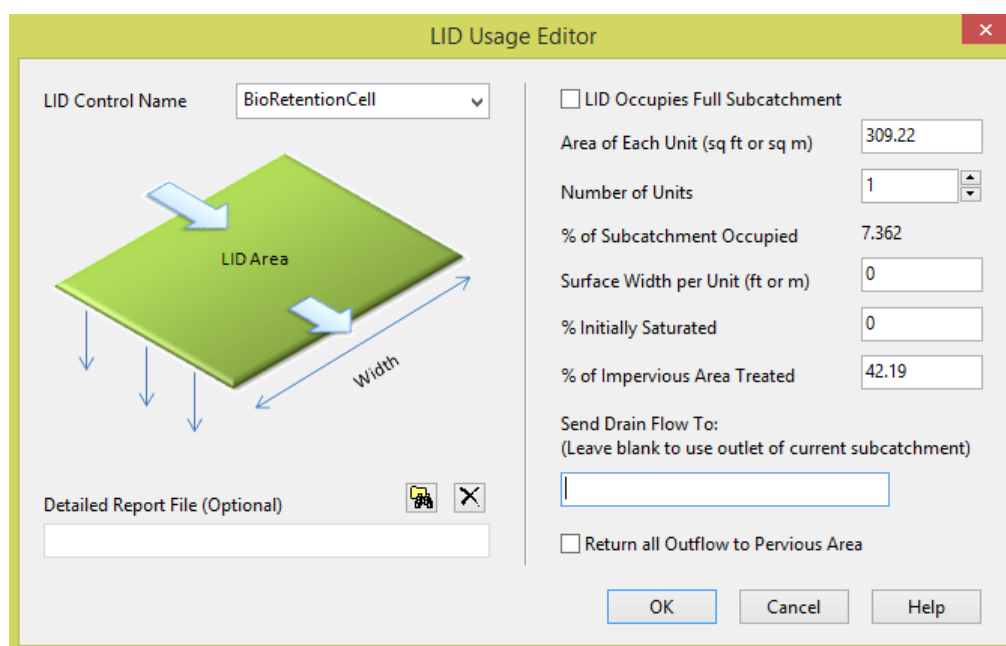


Figura 61: Ejemplo de ventana “LID Usage Editor” para una celda de bio-retención del caso de estudio.



## 6. Cálculo y resultados del caso de estudio

Una vez conocida la motivación del caso de estudio, las características de la zona y cómo y porqué SWMM5 ha sido la herramienta que ha permitido llevarlo a cabo, ya se puede entrar en el desarrollo del mismo. Este capítulo se centra en describir y analizar las diferentes actuaciones relacionadas con un drenaje urbano sostenible en el caso de estudio; el razonamiento detrás de ellas y los resultados en cuanto a mitigación de los efectos de inundaciones y contaminación.

Como ya se ha comentado en capítulos anteriores, la implantación de técnicas LID en el caso de estudio se propone por fases. Se pretende, con ello, evaluar el impacto que generan potencialmente diferentes grados de actuación con técnicas LID. Se proponen 4 escenarios de actuación; a medida que se avanza en ellos, las técnicas LID crecen en número y sofisticación. De este modo, será posible discernir a qué escala se debe plantear el cambio de paradigma en el drenaje pluvial urbano para que los efectos sean lo suficientemente notorios como para descartar una rehabilitación convencional de la red de alcantarillado.

A continuación, se va a detallar, para cada escenario, qué técnicas LID se utilizan, las propiedades de sus capas, cómo se han ubicado y cuál es el razonamiento detrás de todo ello. Además se presentarán los resultados obtenidos en SWMM5 y se compararan los efectos de las técnicas implantadas en cada uno de los escenarios.

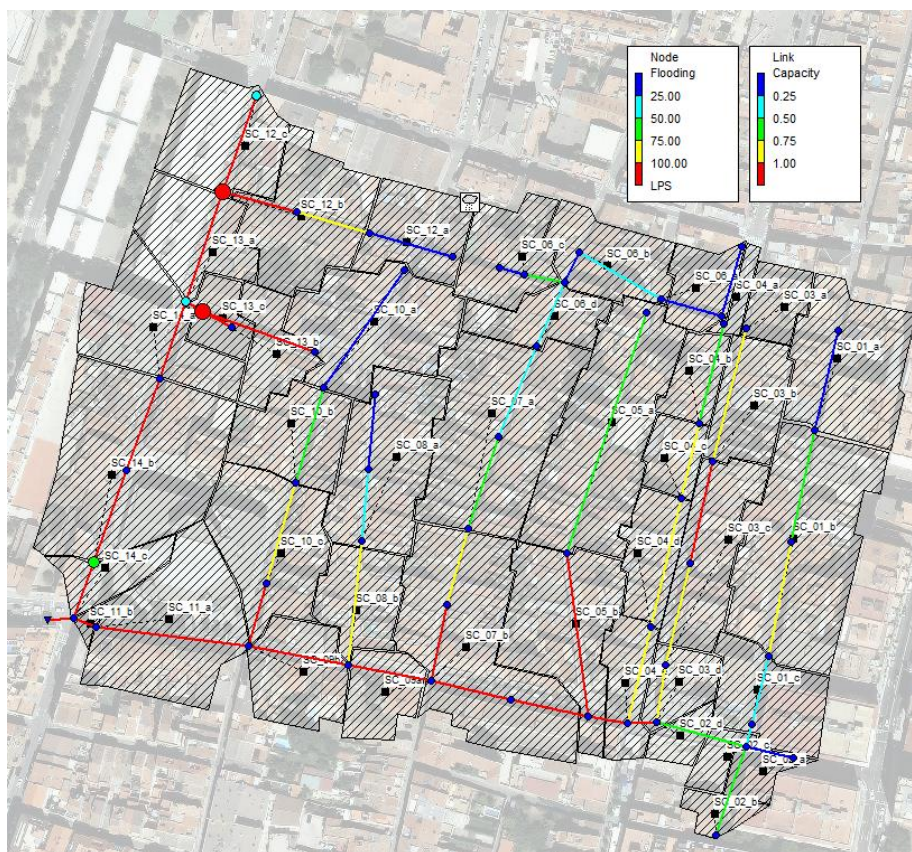
### 6.1. Escenario 0

Se le ha llamado Escenario 0 al análisis de la cuenca de estudio previo a toda actuación mediante técnicas de drenaje urbano sostenible. Se calculará, mediante SWMM5, cuál es la situación actual en la red de drenaje urbano convencional que existe en la cuenca de estudio en el casco urbano de Granollers.

#### 6.1.1. Resultados

Tal y como se preveía, el estado actual de la red de alcantarillado de la cuenca de estudio es muy deficiente. La lluvia de periodo de retorno de 10 años pone de manifiesto las graves deficiencias del sistema de drenaje actual. Cualquier red de drenaje urbano debería estar dimensionada para soportar, al menos, una lluvia de esta frecuencia de repetición. Pero después de la simulación del Escenario 0 en SWMM5 se obtiene que, un total de 303000 litros de agua que deberían haber sido captados por el sistema y evacuados hacia la salida, salen hacia la superficie inundando las calles. Además, 36 de los 57 colectores entran en carga en algún momento y 13 de los 58 pozos de registro liberan agua a las calles en algún instante.

En la figura a continuación se muestra una instantánea de la fracción de capacidad a la que se encuentran los colectores y de los litros/seg que liberan los pozos de registro en el instante más desfavorable de la simulación (1h y 11min después del inicio de la tormenta):

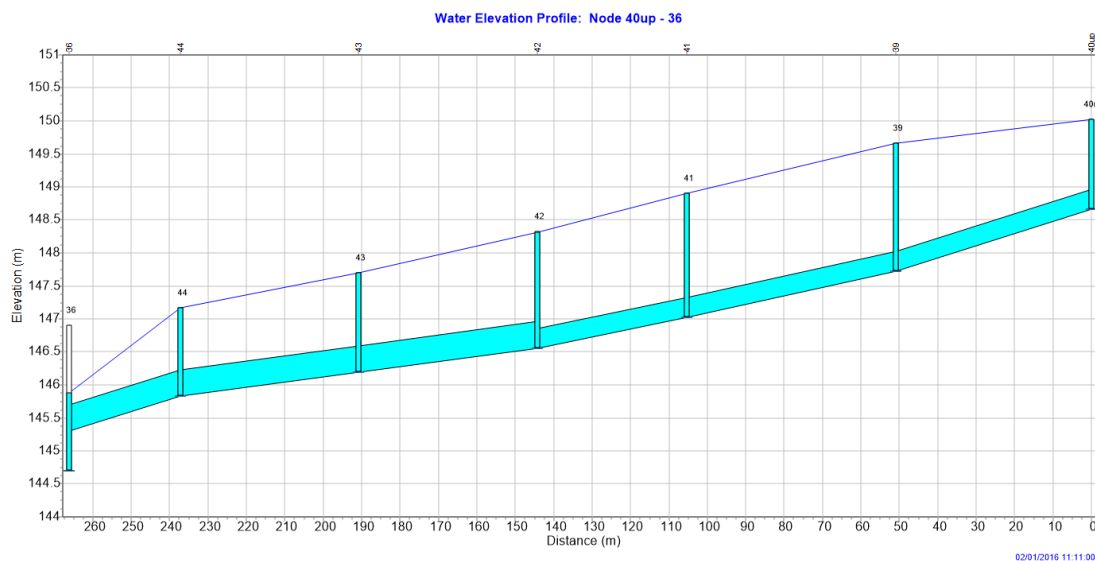


**Figura 62:** Representación por colores de la carga en los colectores y la inundación en los nodos, en el mapa de la cuenca de estudio (1 hora y 11 minutos después del inicio del evento de lluvia).

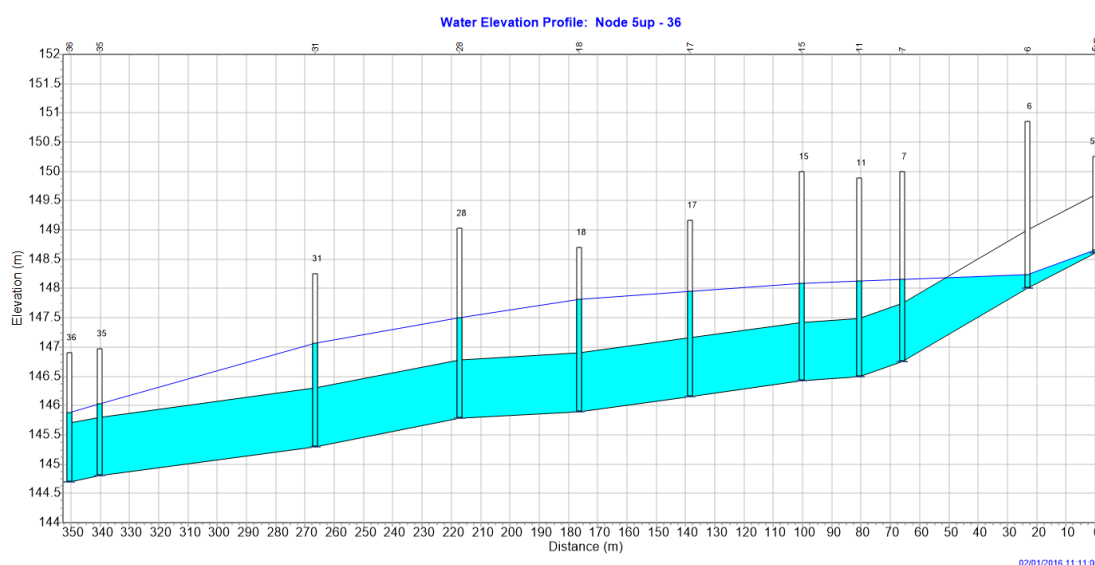
Los conductos coloreados de rojo representan los colectores que han entrado en carga y el color de los nodos denota, en relación con la leyenda, cuantos litros/seg libera cada uno. Se observa, por lo tanto, que los caudales más importantes se concentran en las dos ramas principales de colectores (Oeste, bajo el Carrer de Ponent y sur, bajo el Carrer de Josep Torras i Bages) que recolectan la escorrentía de toda la cuenca. Se puede concluir que serán, principalmente, estos dos sectores los que se encuentran infra-dimensionados.

Los nodos en los que la lámina de agua alcanza la superficie de la calle se encuentran, consecuentemente, en zonas donde los colectores han entrado en carga. En este caso, los principales problemas de inundación se concentran en el Carrer de Ponent y alguna de sus calles perpendiculares.

Con el apoyo de una vista de perfil para ambas ramas, en el mismo instante, se puede analizar la cuestión con más detalle:



**Figura 63:** Vista de perfil de la rama oeste de colectores bajo el Carrer de Ponent (1 hora y 11 minutos después del inicio del evento de lluvia).



**Figura 64:** Vista de perfil de la rama oeste de colectores bajo el Carrer de Josep Torres i Bages (1 hora y 11 minutos después del inicio del evento de lluvia).

Como se puede observar, el problema principal de la red se encuentra en el Carrer de Ponent, en el que, para este instante de la simulación, prácticamente la totalidad de los pozos de registro inundan las calles (la línea azul que representa la altura piezométrica alcanza la altura total de los pozos). El problema reside en que, aun siendo uno de los ejes principales de la red, que recolecta gran parte del caudal de la cuenca, las dimensiones de los colectores son similares a las del resto del sistema. En cambio, los colectores bajo el Carrer de Josep Torres i Bages están dimensionados en concordancia con las solicitaciones a las que se verán sometidos.

## 6.2. Escenario 1

### 6.2.1. Selección y ubicación de las técnicas LID

El Escenario 1 de actuación con técnicas LID es de impacto muy somero. Las técnicas implantadas en esta fase serán solamente en superficie. Se procurará también que, para un primer contacto de la ciudad con las técnicas LID, se trate de iniciativas que alteren lo mínimo posible las dinámicas ciudadanas y que, por lo tanto, sean de construcción rápida y sencilla. Será importante que aporten también un componente estético para que tengan una mayor aceptación social. Por estos motivos, se ha considerado que esta primera fase de actuación con técnicas de drenaje urbano sostenible consista en ubicar celdas de bio-retención en espacios públicos con la superficie necesaria disponible o en algunos terrenos privados donde substituyan zonas ajardinadas o parques, para una fácil implantación. Para la elección de las ubicaciones susceptibles de albergar celdas de bio-retención se han tenido en cuenta las consideraciones que propone “The SuDS Manual” (CIRIA, 2015):

- Superar un ancho de 0,6 m y no sobrepasar un ancho de 20 m, por cuestiones de construcción y mantenimiento.
- No sobrepasar un área de 800 m<sup>2</sup>.
- No sobrepasar una longitud de 40 m.

Se aplican finalmente 5757,14 m<sup>2</sup> de celdas de bio-retención en el total de la cuenca, repartidos en 29 de las 42 sub-cuencas. Estas cubren cerca de un 6% de la superficie total.

Otra técnica de las que SWMM5 es capaz de simular que cumple los requisitos mencionados es la desconexión de bajantes pluviales; por ello se ha considerado interesante aprovechar la implantación de celdas de bio-retención para descargar en estas la escorrentía generada en los tejados cercanos. Para ello, no se va a hacer uso de la unidad LID “Rooftop Disconnection”, sino que resultará mucho más sencillo considerar el área de tejado en cuestión como área impermeable de la sub-cuenca tratada por la celda de bio-retención (opción de la que permite hacer uso SWMM5 en la ventana “LID Usage Editor”); ya que las dos opciones proporcionan el mismo resultado.





Figura 65: Localización de las diferentes celdas de bio-retención dentro de los márgenes de la cuenca de estudio (sombreadas en amarillo).

## 6.2.2. Implementación en el modelo

### 6.2.2.1. Aplicación en las sub-cuencas

Las celdas de bio-retención se ubican en cada sub-cuenca como parte de estas, ya que no existe ningún motivo por el cual debieran crearse nuevas sub-cuencas que alberguen los LID. El motivo reside en que las celdas de bio-retención realizan una función de tratamiento en origen, por lo que ninguna escorrentía será dirigida hacia ellas (sin tener en cuenta la escorrentía proveniente de tejados); principalmente por la existencia de bermas. Es decir, jamás actuarán en serie y, por lo tanto, el método de ubicar los LID más adecuado será, en este caso, insertarlos como propiedad de la sub-cuenca a la que pertenecen.

En consecuencia, los parámetros de impermeabilidad y ancho de las sub-cuencas afectadas por la inclusión de una celda de bio-retención deberán ser ajustados. Se debe tener siempre en cuenta que ambos parámetros se calculan para el área no ocupada por técnicas LID. Por lo tanto, en función de si el LID ocupa un área previamente permeable o impermeable, el parámetro de impermeabilidad crecerá o disminuirá. El valor del parámetro de ancho, debido a que para el Escenario 0 se obtuvo como dato de calibración del modelo, es complejo de recalcular. Se ha

optado por reducir el valor de ancho de manera proporcional a la reducción de área no-LID causada por la aparición de las celdas de bio-retención, en cada una de las sub-cuencas.

#### 6.2.2.2. Definición de capas y parámetros. Análisis de sensibilidad

El procedimiento general que se ha utilizado para definir las propiedades de cada una de las capas de las técnicas LID implementadas, en los diferentes escenarios, es el análisis de sensibilidad. Por medio de esta técnica se podrá averiguar qué parámetros son los más determinantes a la hora de optimizar el rendimiento de cada uno de los elementos LID. El procedimiento utilizado ha sido el siguiente: Se establece un rango razonable para cada parámetro (inspirado por los valores recomendados por el “*SWMM Model User’s Manual*” u otros autores; se pueden encontrar en la sección 5.3.2. *Características de las capas y sus parámetros*) y se corren varias simulaciones para valores comprendidos en el rango mientras el resto de parámetros se mantiene en un valor medio; a continuación se escoge para cada parámetro el valor que mejor resultado da, en función de las deducciones que se puedan hacer a raíz del comportamiento que se observa en el LID y de las pérdidas por inundación del sistema. El análisis se realiza en una única sub-cuenca que contenga el elemento LID objeto de estudio; se procura escogerla de manera que se obtengan resultados representativos del total de LIDs implementados.

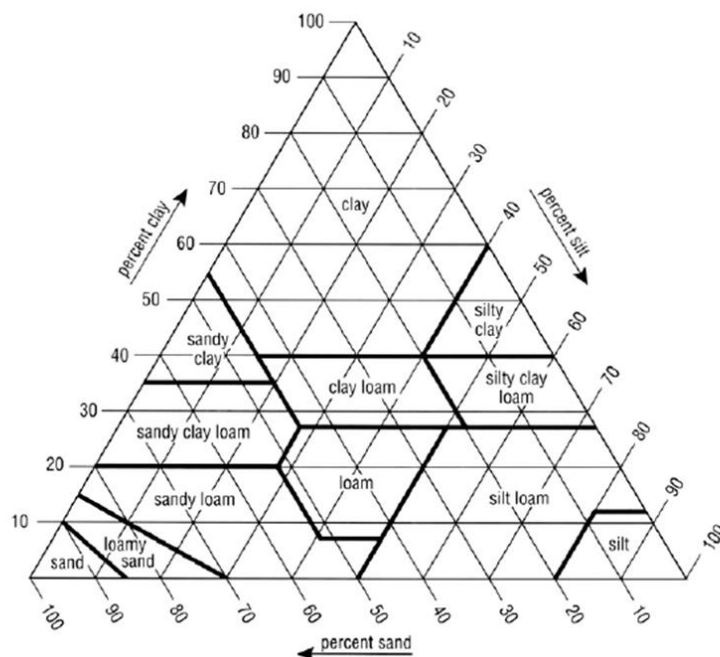
Por lo que respecta a las celdas de bio-retención del Escenario 1 se estudia la sensibilidad de cada uno de los parámetros a excepción de las propiedades de porosidad, capacidad de campo, punto de marchitez, conductividad, pendiente de conductividad y altura de succión de la capa de suelo; ya que estos son propiedades intrínsecas de la tipología de suelo que se utilice. Estas propiedades serán valoradas en conjunto en el análisis de sensibilidad. Se propondrán valores distintos para cada uno de estos parámetros asociándolos con distintos tipos de suelo y se realizará el análisis de sensibilidad sobre las tipologías de suelo, en vez de sobre cada uno de los parámetros. Los valores propuestos se pueden consultar en la tabla a continuación:

Suelo	Porosidad	Capacidad de campo	Punto de marchitez	Conductividad hidráulica	Pendiente de conductividad	Altura de succión
	(%)	(%)	(%)	(mm/h)		(mm)
Arena	0,437	0,062	0,024	120,396	48,65	49,022
Arena margosa	0,437	0,105	0,047	29,972	49,025	60,96
Marga arenosa	0,453	0,19	0,085	10,922	39,7	109,982
Marga	0,463	0,232	0,116	3,302	43,7375	88,9
Marga limosa	0,501	0,284	0,135	6,604	23,6875	169,926
Marga areno-arcillosa	0,398	0,244	0,136	1,524	53,375	219,964
Marga arcillosa	0,464	0,31	0,187	1,016	44,2875	210,058
Marga limo-arcillosa	0,471	0,342	0,21	1,016	33,4875	270,002
Arcilla arenosa	0,43	0,321	0,221	0,508	64,65	240,03
Arcilla limosa	0,479	0,371	0,251	0,508	47,3	290,068
Arcilla	0,475	0,378	0,265	0,254	70,3	320,04

Tabla 2: Propiedades de la capa suelo para diferentes tipos de suelo.



Los valores de porosidad, capacidad de campo, punto de marchitez, conductividad y altura de succión se han tomado de los valores recomendados en el Apéndice A.2 del “*SWMM Model User’s Manual*”. Los valores de pendiente de conductividad se han estimado con el método mencionado en la sección 5.3.2. *Características de las capas y sus parámetros* y con la ayuda de la clasificación del suelo por texturas del Departamento de Agricultura de los EEUU (USDA) que se resume en la siguiente figura:



**Figura 66:** Clasificación del suelo por texturas del USDA, que especifica los porcentajes de arena y arcilla de cada una de las tipologías de suelo utilizadas.

Los valores de conductividad hidráulica de la Tabla 1 se tomarán también para el análisis de sensibilidad del parámetro “capacidad de infiltración” de la capa de almacenamiento a lo largo de todo el estudio.

En primer lugar se va a realizar el análisis de sensibilidad para escoger el tipo de suelo a utilizar y, una vez escogido, se va a mantener para el resto del análisis a fin de reducir el número de simulaciones a realizar. El análisis de sensibilidad al completo se puede consultar en el ANEXO 3.

En la tabla resumen, a continuación, se pueden ver las propiedades de las diferentes capas que se han utilizado finalmente en la simulación del Escenario 1:

Propiedades de los parámetros de cada capa			
Elemento LID	Celda de bio-retención		
Capa superficie	Altura de berma	(mm)	300
	Volumen de vegetación	-	0
Capa de suelo	Tipo de suelo	-	Arena
	Espesor	(mm)	450
Capa de almacenamiento	Espesor	(mm)	300
	Relación de huecos	-	0,625
	Velocidad de infiltración del terreno	(mm/h)	29,972
	Factor de colmatación	-	0

Tabla 3: Resumen de propiedades de los parámetros de las capas para las celdas de bio-retención del Escenario 1.

### 6.2.3. Resultados

Una vez aplicados en el modelo los valores presentados anteriormente para las celdas de bio-retención, se procederá correr la simulación y a averiguar si ha mejorado el funcionamiento del sistema de drenaje de la cuenca de estudio; en caso afirmativo se analizarán las mejoras con respecto al Escenario 0.

Para exactamente la misma lluvia de diseño, en el Escenario 1, las pérdidas de agua del sistema por inundación de las calles es de 152000 litros; aproximadamente un 50% menos que sin las celdas de bio-retención. Es cierto que se trata de una actuación que implica un porcentaje elevado de la superficie de la cuenca, pero en ningún caso se están contabilizando áreas donde resulta imposible ubicar una celda de bio-retención. Si existe la voluntad, se puede conseguir una reducción del volumen de agua de inundación a la mitad solamente transformando áreas perfectamente convertibles en elementos LID de superficie y de tratamiento en origen en celdas de bio-retención; cuya construcción es de impacto mínimo para la dinámica de la ciudad. Se trata de un resultado significativamente positivo aunque, por otro lado, continúa existiendo un valor muy elevado de agua perdida en la superficie de las calles. En cualquier caso, el resultado es alentador para continuar proponiendo escenarios de actuación más agresivos y así averiguar qué pueden llegar a lograr las técnicas de drenaje urbano sostenible en la cuenca de estudio. Ahora son 24 de los 57 colectores los que entran en carga y 10 de los 58 pozos los que liberan agua a las calles en algún instante.

En la figura a continuación se muestra una instantánea de la fracción de capacidad a la que se encuentran los colectores y de los litros/seg que liberan los pozos de registro en el instante más desfavorable de la simulación (1h y 09 min después del inicio de la tormenta):

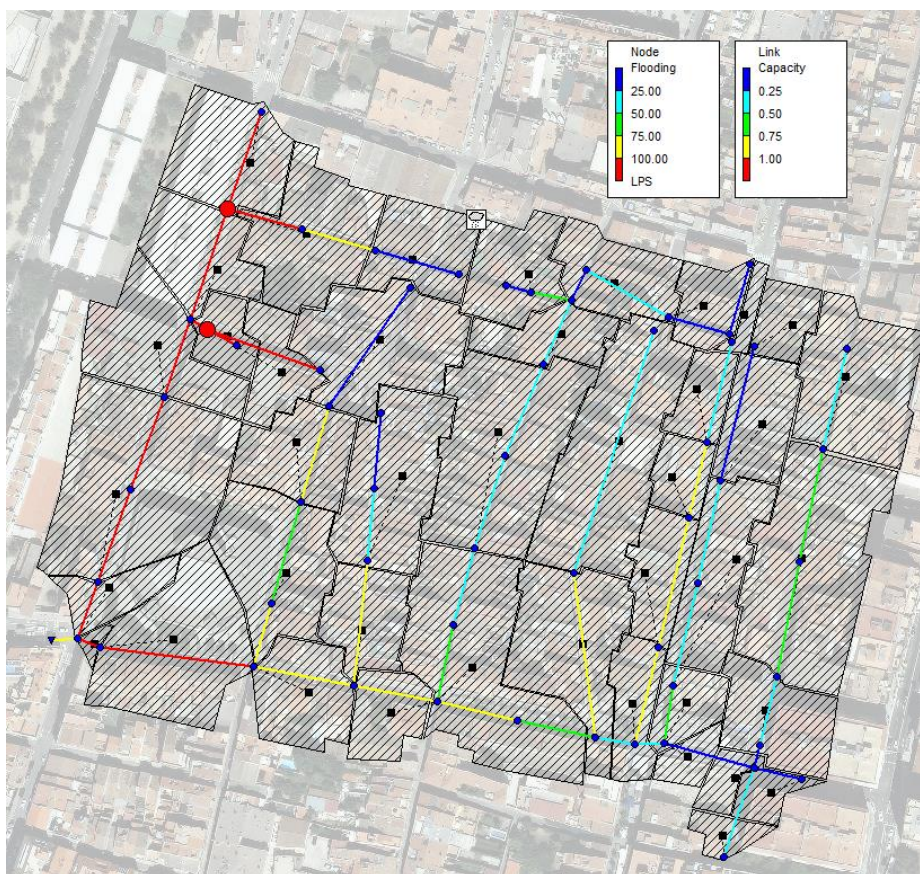
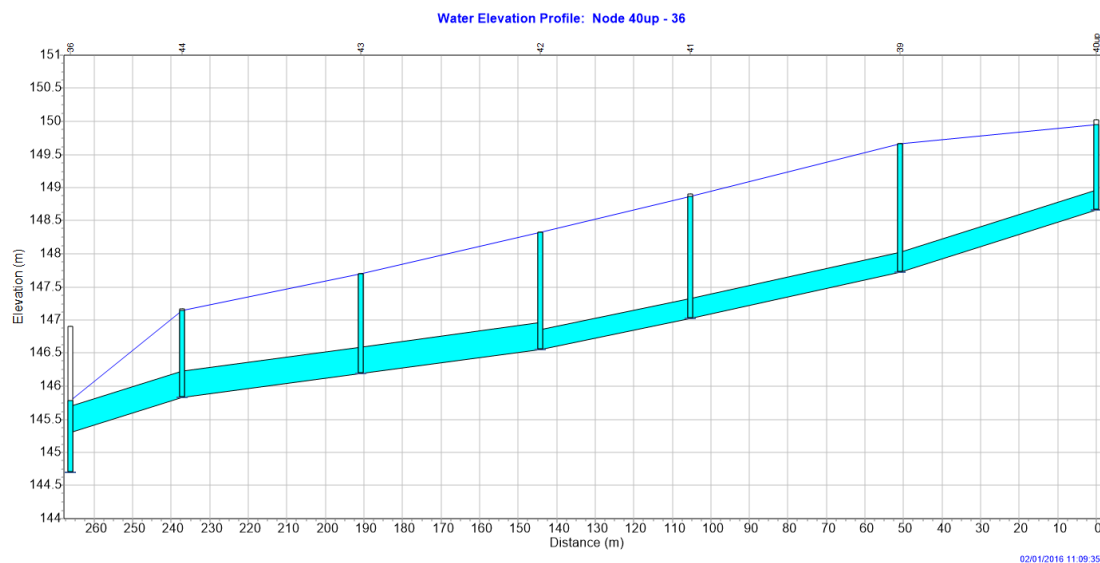


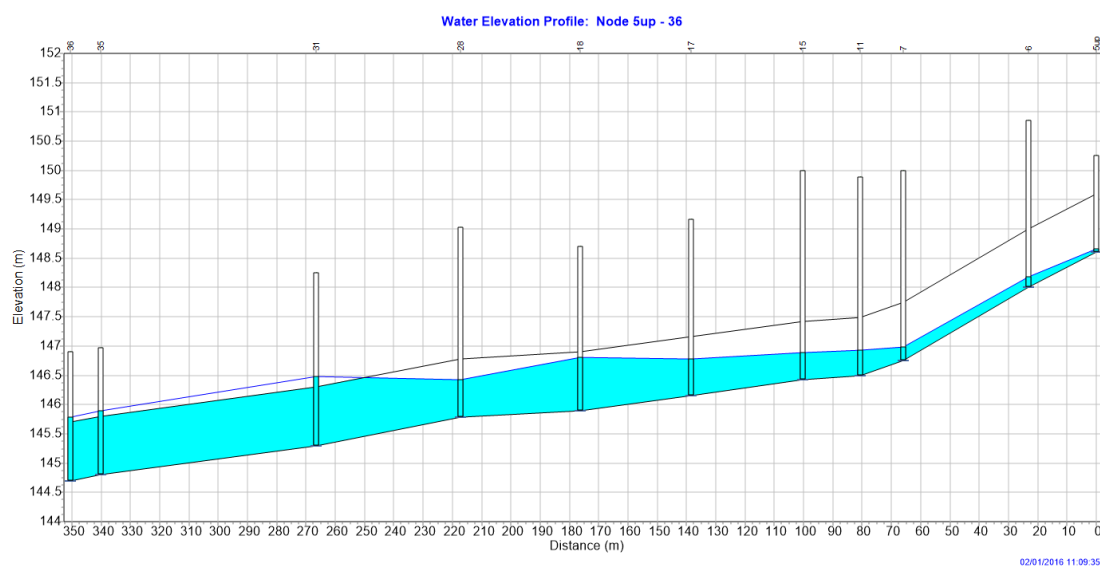
Figura 67: Representación por colores de la carga en los colectores y la inundación en los nodos, en el mapa de la cuenca de estudio (1 hora y 9 minutos después del inicio del evento de lluvia).

Los principales cambios que se observan son la liberación de carga de los colectores bajo el Carrer de Josep Torras i Bages y la persistencia de los problemas de inundación en el Carrer de Ponent. Al ser el área tributaria de la rama sur de colectores mucho mayor a la del eje principal este, el primero se ve mucho más beneficiado de la reducción de caudal. Por otro lado, se constata el problema de infra-dimensionamiento de los colectores del Carrer de Ponent, que prácticamente ven inalterada su situación.

Se observa en las vistas de perfil de ambas ramas como en el Carrer de Ponent únicamente el pozo de registro aguas arriba es el único que deja de desbordar, mientras que en el Carrer de Josep Torras i Bages la situación se normaliza en gran medida, desapareciendo la inundación por completo.



**Figura 68:** Vista de perfil de la rama oeste de colectores bajo el Carrer de Ponent (1 hora y 9 minutos después del inicio del evento de lluvia).



**Figura 69:** Vista de perfil de la rama oeste de colectores bajo el Carrer de Josep Torras i Bages (1 hora y 9 minutos después del inicio del evento de lluvia).

## 6.3. Escenario 2

### 6.3.1. Selección y ubicación de las técnicas LID

El Escenario 2 de actuación con técnicas LID parte del Escenario 1 como situación inicial; por lo tanto, ninguno de los elementos LID incorporados hasta el momento se modifica.

El Escenario 2 se caracteriza por incorporar, aun en pequeña medida, un grado de concienciación ciudadana. Esto se traduce en el uso, en la cuenca de estudio, de un pequeño porcentaje de superficie en propiedad privada como técnicas LID. Además, ya no solo se utilizan técnicas en superficie, sino que para ciertas actuaciones será necesaria una mayor profundidad de excavación. Aun así, sigue siendo un escenario de impacto relativamente somero en las actividades urbanas, ya que todas las actuaciones de nueva incorporación son en propiedad privada.

Se ha considerado que algunos de los propietarios de viviendas que disponen de patio propio han tomado la decisión de construir en él un jardín de lluvia o bien una zanja de infiltración. En vez de ubicar cada uno de los elementos LID mencionados individualmente se ha considerado que un 20% del total de área de patios interiores se destinará a la construcción de un jardín de lluvia y que otro 20% del área alberga un zanja de infiltración enterrada (se parte del supuesto de que en ningún patio coinciden ambas actuaciones). De esta manera se simplifica en gran medida la medición de áreas, ya que será suficiente con medir el área de patios interiores de cada sub-cuenca. En 27 de las 42 sub-cuencas se pueden encontrar viviendas con patio propio, luego serán estas las únicas sub-cuencas afectadas en este escenario de actuación. Finalmente se aplica un total de 2579,77 m<sup>2</sup> tanto de jardines de lluvia como de zanjas de infiltración en toda la cuenca de estudio. Los jardines de lluvia cubren un 2,7% de la superficie total.

Otra técnica LID de fácil implantación en viviendas privadas que no requiere que se disponga de terreno no edificado es el rain barrel. Se trata de una medida de aportación modesta a la reducción de escorrentía, pero se aprovechará este estudio para verificar hasta qué punto puede colaborar en dicha tarea. Se ha considerado, para este escenario de actuación, la ubicación de un total de 140 rain barrels, repartidos entre las sub-cuencas de manera ponderada en función del área de cada una.

De nuevo se sacará partido de la desconexión de bajantes de pluviales por su simplicidad. Las tres medidas implantadas en este escenario tratarán parte de la escorrentía generada en los tejados. Para repartir de manera lógica la escorrentía tratada por cada una de las medidas LID se ha supuesto que un 20% de la escorrentía generada en tejados con patio se vierte en los jardines de lluvia, otro 20% se direcciona hacia las zanjas de infiltración y que un 1% del área de tejados total se vierte a rain barrels. Este último dato se ha estimado de manera que los rain barrels sean capaces de tratar gran parte de la escorrentía que les llega.

Para modelizar las desconexiones de bajantes, solamente se ha utilizado la unidad LID “Rooftop Disconnection” para las zanjas de infiltración. Tanto para jardines de lluvia como rain barrels se considera el área de tejado correspondiente en cada caso como área impermeable de la sub-cuenca tratada por el LID (opción de la que permite hacer uso SWMM5 en la ventana “LID Usage Editor”).

### 6.3.2. Implementación en el modelo



### 6.3.2.1. Aplicación en las sub-cuencas

Tanto los jardines de lluvia como los rain barrels se ubican en cada sub-cuenca como parte de estas, es decir, ocupan un área que sigue perteneciendo a la sub-cuenca. En cambio las zanjas de infiltración se encuentran en sub-cuencas aparte, que dedican toda su área a estas. Esto se debe a que las zanjas de infiltración, al no ser una técnica de tratamiento en origen y encontrarse enterradas, no reciben agua de lluvia directamente sobre ellas y, por lo tanto, no pueden formar parte de las sub-cuencas originales. Se han creado así 27 sub-cuencas adicionales cuya área es equivalente al 20% del área de patios interiores de las sub-cuencas donde se encuentran las zanjas de infiltración. A estas sub-cuencas no se les asocia ninguna serie temporal de lluvia. En la ventana “LID Usage Editor” de la técnica “Rooftop Disconnection”, que se ha creado previamente para las sub-cuencas con zanjas de infiltración, se debe especificar que la escorrentía resultante de la desconexión de bajante pluvial se vierte en la nueva sub-cuenca que alberga las zanjas de infiltración.

Los parámetros de impermeabilidad y ancho de cada una de las sub-cuencas afectadas deberán ser reajustados; aunque sin tener en cuenta las zanjas de infiltración que no forman parte de estas y no afectan al ajuste de parámetros al encontrarse enterradas. Al no poderse discernir si los jardines de lluvia y los rain barrels se han implantado sobre superficie previamente impermeable o permeable, se considerará que se reparten equitativamente entre los dos tipos de superficie; esto se traduce en que el porcentaje de impermeabilidad de la sub-cuenca no variará en ningún caso. No sucede así para el parámetro de ancho que sí deberá ser ajustado. El ajuste se realiza siguiendo el mismo razonamiento que para el Escenario 1.

### 6.3.2.2. Definición de capas y parámetros. Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad se ha realizado, para el Escenario 2, bajo los mismos principios que para el Escenario 1. Dado que las técnicas LID implementadas en el Escenario 1 no han sido modificadas, no será necesario volver a analizar la sensibilidad de los parámetros de las celdas de bio-retención; se va a centrar la atención en el análisis de los parámetros de jardines de lluvia, zanjas de infiltración y rain barrels. Además, dado el claro beneficio que aporta el uso de arena en comparación con otros tipos de sustrato que se ha observado en el análisis de sensibilidad del Escenario 1, se ha optado por utilizarla en todas las capas de suelo que aparezcan a lo largo del estudio; de esta manera se simplifica el proceso. El análisis de sensibilidad al completo se puede consultar en el ANEXO 3.

En las tablas resumen, a continuación, se pueden ver las propiedades de las diferentes capas que se han utilizado finalmente en la simulación del Escenario 2:

Propiedades de los parámetros de cada capa			
Elemento LID	Jardín de lluvia		
Capa superficie	Altura de berma	(mm)	200
	Volumen de vegetación	-	0
Capa de suelo	Tipo de suelo	-	Arena
	Espesor	(mm)	675



Propiedades de los parámetros de cada capa			
Elemento LID	Pozo de infiltración		
Capa superficie	Altura de berma	(mm)	0
	Volumen de vegetación	-	0
Capa de almacenamiento	Espesor	(mm)	450
	Relación de huecos	-	0,75
	Velocidad de infiltración del terreno	(mm/h)	29,972
	Factor de colmatación	-	0

Propiedades de los parámetros de cada capa			
Elemento LID	Rain barrel		
Capa de almacenamiento	Espesor	(mm)	1000
Dren	Coeficiente de dren	-	2,75
	Exponente de dren	-	0,5
	Altura de dre	(mm)	0
	Aplazamiento de liberación	(h)	1

Propiedades de los parámetros de cada capa			
Elemento LID	Desconexión de bajantes pluviales		
Capa de superficie	Altura de berma	(mm)	0
	Rugosidad de la superficie	-	0,02
	Pendiente de la superficie	(%)	20
Dren	Capacidad máxima	(mm/h)	0

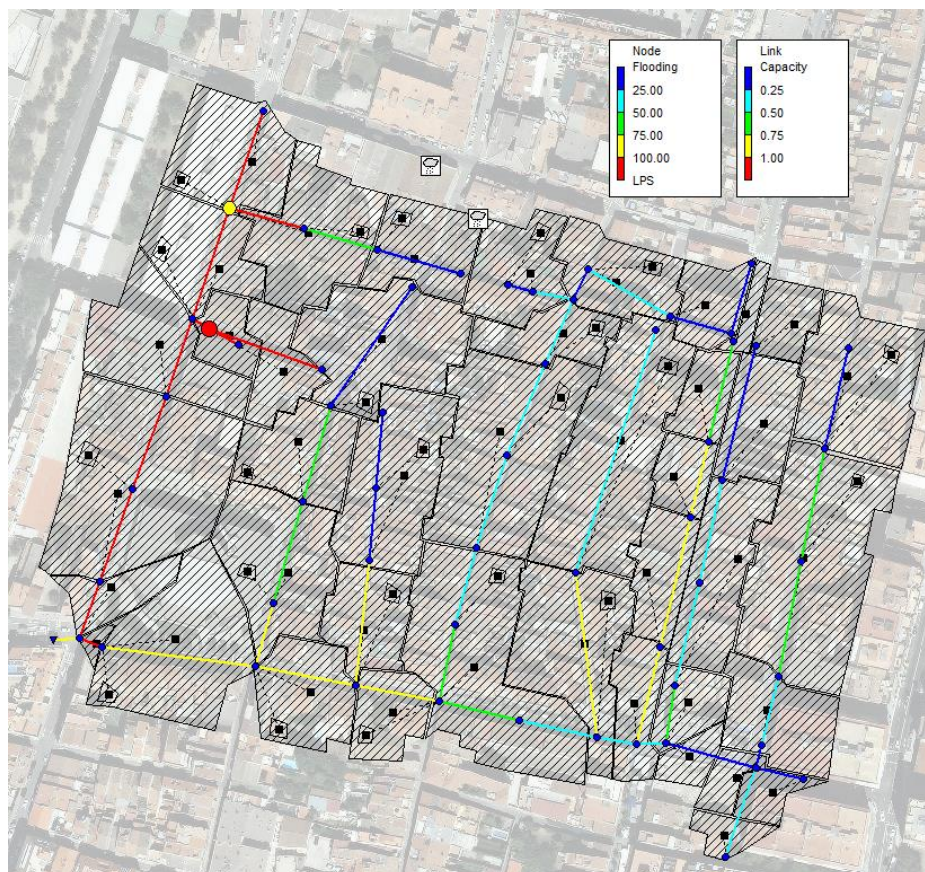
Tabla 4: Resumen de propiedades de los parámetros de las capas para los jardines de lluvia, zanjas de infiltración, rain barrels y desconexiones de bajantes pluviales del Escenario 2.

### 6.3.3. Resultados

De nuevo se procederá a correr la simulación y a comprobar las mejoras que proporcionan los nuevos elementos LID en el sistema de drenaje de la cuenca de estudio.

En este caso se observa una reducción bastante más moderada de las pérdidas de agua del sistema por inundación, en comparación con los resultados del Escenario 1; para el Escenario 2 este valor es de 114000 litros. Podemos deducir, por lo tanto, que los jardines de lluvia, zanjas de infiltración y rain barrels en viviendas particulares son medidas LID de menor impacto ante eventos de lluvia importantes que las celdas de bio-retención. Aun así, tampoco se debe menospreciar el efecto que tienen estas, ya que consiguen reducir en 38000 litros la inundación de las calles, partiendo de un escenario sobre el que ya se ha actuado. En cualquier caso se continúa obteniendo un valor muy alto de pérdidas en el sistema de drenaje por inundación, por lo que se debe insistir en la aplicación de técnicas de drenaje urbano sostenible en la cuenca de estudio en próximos escenarios. Ahora son 22 de los 57 colectores los que entran en carga y 7 de los 58 pozos los que liberan agua a las calles en algún instante.

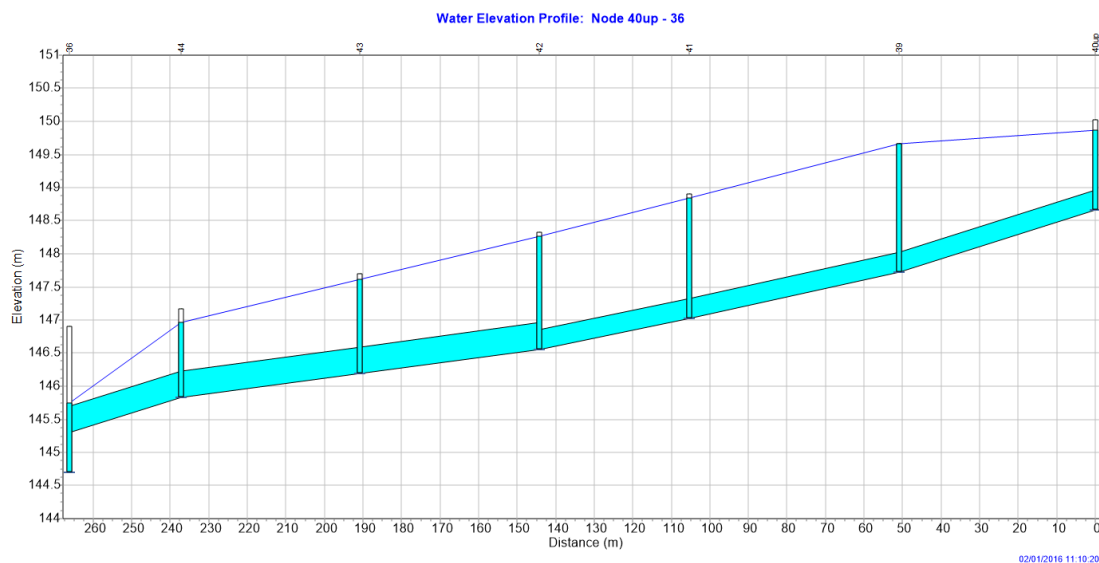
En la figura a continuación se muestra una instantánea de la fracción de capacidad a la que se encuentran los colectores y de los litros/seg que liberan los pozos de registro en el instante más desfavorable de la simulación (1h y 10 min después del inicio de la tormenta):



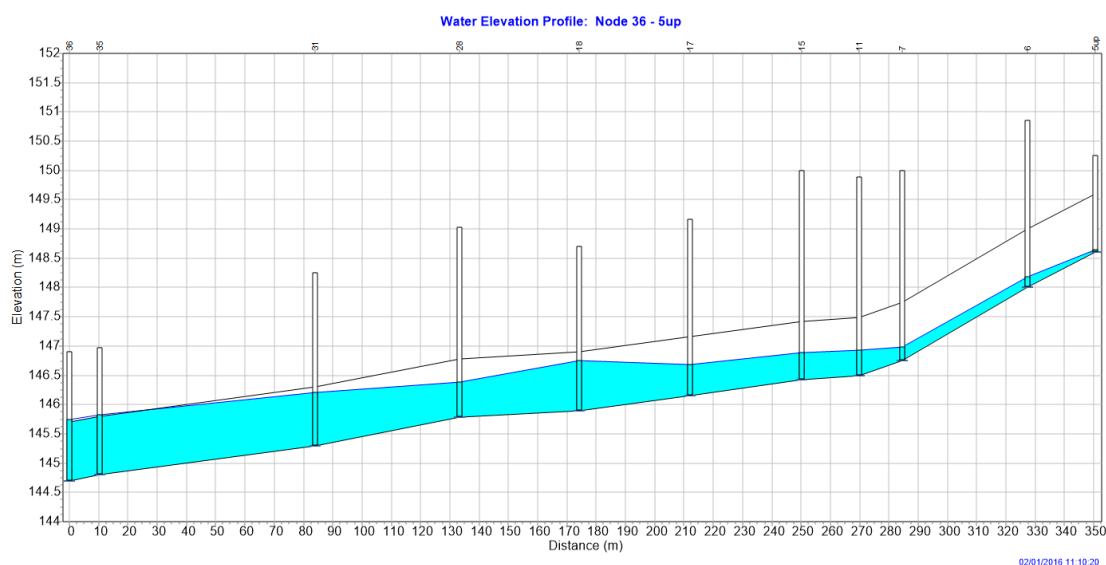
**Figura 70:** Representación por colores de la carga en los colectores y la inundación en los nodos, en el mapa de la cuenca de estudio (1 hora y 9 minutos después del inicio del evento de lluvia).

Este mapa nos confirma lo que se comenzaba a vislumbrar después del Escenario 1: la cuenca de estudio sufre de un problema de capacidad de los colectores muy concentrado en su extremo más occidental. El eje de colectores bajo el Carrer de Ponent continúa estando en carga en su totalidad; únicamente se reduce ligeramente la inundación en uno de los pozos de registro más problemáticos. Por otro lado, los colectores bajo el Carrer de Josep Torras i Bages funcionan ya prácticamente con normalidad.

Aun así, al consultar los perfiles de ambas ramas de colectores, se puede ver como la lámina de agua en los pozos de registro del Carrer de Ponent se encuentra ya ligeramente bajo el nivel de la calzada. Eso significa que incluso la inundación en el Carrer de Ponent está cerca de eliminarse también.



**Figura 71:** Vista de perfil de la rama oeste de colectores bajo el Carrer de Ponent (1 hora y 9 minutos después del inicio del evento de lluvia).



**Figura 72:** Vista de perfil de la rama oeste de colectores bajo el Carrer de Josep Torras i Bages (1 hora y 9 minutos después del inicio del evento de lluvia).

No obstante, no son los pozos de registro del Carrer de Ponent los que más agua expulsan a las calles, sino uno de los pozos en el Carrer Almogàvers, una de las calles perpendiculares al Carrer de Ponent; el único que supera los 100 litros/seg en el mapa anterior. Tanto es así, que el máximo caudal de inundación de este nodo (202,37 litros/seg) duplica con creces al del Carrer de Ponent, que es el segundo nodo más problemático de la cuenca de estudio (89,12 litros/seg).

## 6.4. Escenario 3

### 6.4.1. Selección y ubicación de las técnicas LID

El Escenario 3 parte del Escenario 2 como situación inicial. Esto implica que ninguno de los elementos LID incorporados hasta el momento va a ser modificado. Sin embargo, a diferencia de cómo se procedió en el Escenario 2, se van a añadir solamente técnicas LID de tipologías ya incorporada en escenarios anteriores.

La evolución del cambio de paradigma en el drenaje urbano se plasma, en este Escenario 3, de dos maneras distintas: Se considera que la concienciación ciudadana crece, con respecto al Escenario 2, por medio de la ubicación de un mayor número de técnicas de drenaje sostenible en viviendas particulares; y se toma la decisión de utilizar toda la superficie asfaltada de la cuenca de estudio como zanja de infiltración, enterrándola bajo la propia calzada.

El aumento de la concienciación y participación ciudadana se consigue principalmente potenciando las medidas no estructurales (ya comentadas en la sección 3.5.1. *Medidas no estructurales*) y por medio del planteamiento de incentivos económicos a la construcción de unidades LID particulares, como la reducción de tasas de alcantarillado, mejoras en los precios del agua, etc. En este escenario se considerará que el porcentaje de áreas de patios particulares destinado a jardines de lluvia y zanjas de infiltración pasa a ser del 30% y que el número de rain barrels aumenta hasta 275. Por lo tanto el total de área destinada a jardines de lluvia es ahora 3869,66 m<sup>2</sup>. Siguiendo la misma lógica que para el Escenario 2, ahora un 30% de la escorrentía generada en tejados con patio se vierte en los jardines de lluvia, otro 30% se direcciona hacia las zanjas de infiltración y un 2% del área de tejados total se vierte a rain barrels. Las conexiones de los diferentes elementos LID con sus respectivas áreas de tejado tributarias se modelizan del mismo modo que en el Escenario 2.

La medida de construir una zanja de infiltración continua bajo toda la superficie de calzada de la cuenca es una decisión arriesgada. El Escenario 3 es un estadio avanzado en el proceso de incorporación de medidas LID para la eliminación de los problemas de inundación de la cuenca y, por lo tanto, se requieren medidas cada vez más agresivas. Además, toda la escorrentía generada tanto en la calzada como en las aceras será dirigida a este elemento LID. La conexión se realizará mediante el elemento LID “Rooftop Disconnection” aunque no se trate de una desconexión de bajante pluvial, ya que su función es simplemente la de transferir escorrentía de una superficie impermeable a una técnica LID. Esta gran zanja de infiltración se modeliza de manera equivalente a las zanjas situadas en los patios de viviendas.

### 6.4.2. Implementación en el modelo

#### 6.4.2.1. Aplicación en las sub-cuencas

Al igual que las zanjas de infiltración en viviendas particulares, se deberán crear sub-cuencas adicionales para ubicar la zanja de infiltración bajo la calzada. Estas sub-cuencas tendrán un área equivalente al área de calzada de cada una de las sub-cuencas originales.

Para el reajuste de parámetros de impermeabilidad y ancho de las sub-cuencas originales se procederá análogamente al Escenario 2. De nuevo, no deberán tenerse en cuenta las zanjas de infiltración para ello ya que, al encontrarse enterradas, no ocupan un área perteneciente a la superficie de las sub-cuencas originales.

Para simular la derivación de la escorrentía generada en calzada y aceras hacia las nuevas sub-cuencas que contienen las nuevas zanjas de infiltración se crearán dos técnicas LID, aparte de la desconexión de bajantes pluviales creada en el Escenario 2. Esto se debe a que las propiedades de superficie de calzada, acera y tejado no van a coincidir.

#### 6.4.2.2. Definición de capas y parámetros. Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad se ha realizado, para el Escenario 3, bajo los mismos principios que para los escenarios anteriores. Dado que las técnicas LID implementadas en el Escenario 1 no han sido modificadas, no será necesario volver a analizar la sensibilidad de los parámetros de las celdas de bio-retención. No será así para las técnicas incorporadas en el Escenario 2, ya que se ha incrementado el área que estas ocupan y, por consiguiente, la relevancia de cada uno de los parámetros de sus capas podría variar. Se analizarán también los tres tipos de “Rooftop Disconnection” que existen en este escenario. El análisis de sensibilidad al completo se puede consultar en el ANEXO 3.

En las tablas resumen, a continuación, se pueden ver las propiedades de las diferentes capas que se han utilizado finalmente en la simulación del Escenario 3:

Propiedades de los parámetros de cada capa			
Elemento LID	Jardín de lluvia		
Capa superficie	Altura de berma	(mm)	200
	Volumen de vegetación	-	0
Capa de suelo	Tipo de suelo	-	Arena
	Espesor	(mm)	675

Propiedades de los parámetros de cada capa			
Elemento LID	Pozo de infiltración		
Capa superficie	Altura de berma	(mm)	0
	Volumen de vegetación	-	0
Capa de almacenamiento	Espesor	(mm)	450
	Relación de huecos	-	0,75
	Velocidad de infiltración del terreno	(mm/h)	29,972
	Factor de colmatación	-	0



Propiedades de los parámetros de cada capa			
Elemento LID	Rain barrel		
Capa de almacenamiento	Espesor	(mm)	1000
	Coeficiente de dren	-	2,75
Dren	Exponente de dren	-	0,5
	Altura de dre	(mm)	0
	Aplazamiento de liberación	(h)	1

Propiedades de los parámetros de cada capa			
Elemento LID	Desconexión de bajantes pluviales		
Capa de superficie	Altura de berma	(mm)	0
	Rugosidad de la superficie	-	0,02
	Pendiente de la superficie	(%)	20
Dren	Capacidad máxima	(mm/h)	0

Propiedades de los parámetros de cada capa			
Elemento LID	Conexión de calzadas		
Capa superficie	Altura de berma	(mm)	0
	Rugosidad de la superficie	-	0,013
	Pendiente de la superficie	(%)	2
Dren	Capacidad máxima	(mm/h)	0

Propiedades de los parámetros de cada capa			
Elemento LID	Conexión de aceras		
Capa de superficie	Altura de berma	(mm)	0
	Rugosidad de la superficie	-	0,016
	Pendiente de la superficie	(%)	1
Dren	Capacidad máxima	(mm/h)	0

Tabla 5: Resumen de propiedades de los parámetros de las capas para los jardines de lluvia, zanjas de infiltración, rain barrels, desconexiones de bajantes pluviales y conexiones de calzadas y aceras del Escenario 3.

### 6.4.3. Resultados

Con los valores de los parámetros de cada capa presentados en el apartado anterior, se procede a calcular la simulación del Escenario 3 y a comprobar en qué medida los resultados obtenidos mejoran los de los escenarios anteriores.

La reducción en términos de inundación total del sistema es, en este caso, considerablemente elevada en términos relativos. El volumen de agua perdido en el sistema de drenaje por desborde hacia las calles es, para el Escenario 3, de 39000 litros. Por lo tanto, se ha producido una reducción de aproximadamente el 65% con respecto al Escenario 2; la mayor reducción en términos relativos de los tres escenarios estudiados hasta el momento. Esta reducción se puede atribuir a la gran extensión que se ocupa con la zanja de infiltración bajo la calzada; extender una zanja de infiltración en una superficie equivalente al 12,64% del área total de la cuenca de



estudio proporcionará un volumen de almacenamiento extraordinario, lo que se traduce en grandes beneficios en cuanto a reducción de los volúmenes totales de inundación. Ahora son 16 de los 57 colectores los que entran en carga y 6 de los 58 pozos los que liberan agua a las calles en algún instante.

El mapa de inundación en pozos y carga en colectores (1h y 10 min después del inicio de la tormenta) no muestra, en este escenario, grandes cambios con respecto al del escenario anterior. Continúa sorprendiendo como, aun habiéndose reducido en gran medida la escorrentía generada de manera general en la cuenca de estudio, el eje de colectores bajo el Carrer de Ponent continúa entrando en carga en todos sus tramos.

Por otro lado, el pozo de registro del Carrer Almogàvers mencionado en el anterior escenario continúa siendo el más problemático. Sin embargo, su caudal máximo de liberación se ha reducido hasta 128,6 litros/seg. Un dato que resulta muy revelador es que este nodo expulsa por si solo un total de 35000 litros de agua a las calles, a lo largo de toda la simulación (en comparación con los 39000 litros de inundación total del sistema). Esto sitúa a la colaboración de los otros 5 nodos que desbordan en algún momento de la simulación en un valor prácticamente anecdótico (Otros 3000 litros corresponden al único nodo que continúa inundando en el Carrer de Ponent). Se podría decir que es este pozo de registro el que impide una rehabilitación total de la red de drenaje, a este nivel de actuación mediante técnicas LID.

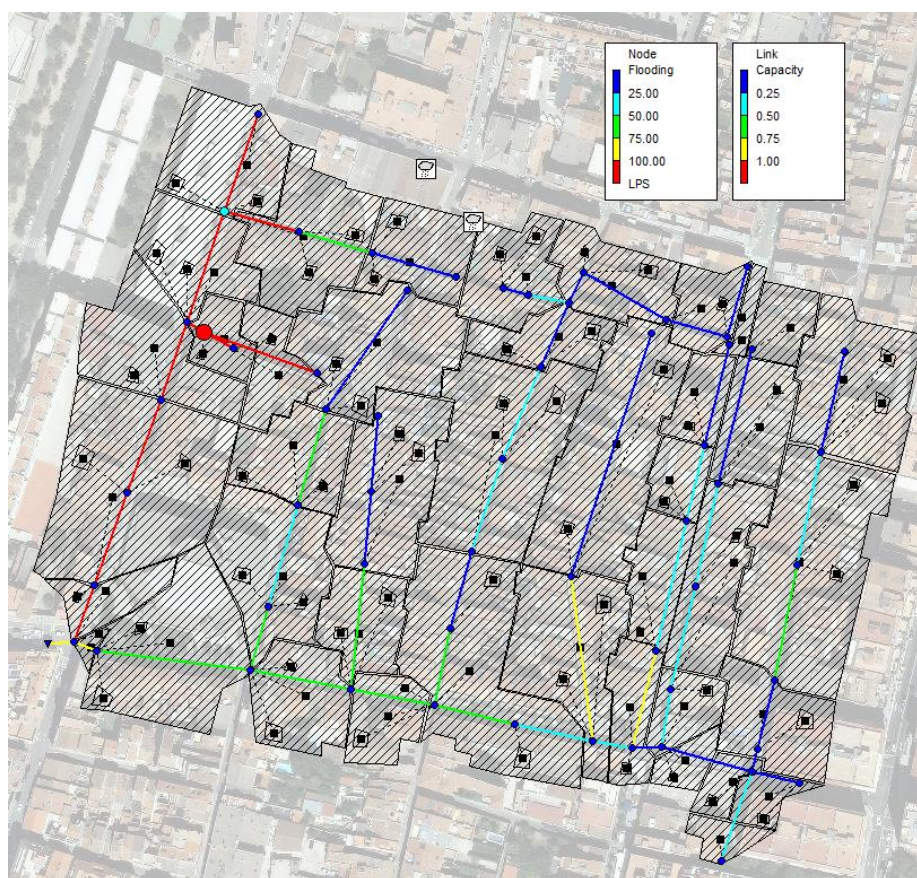
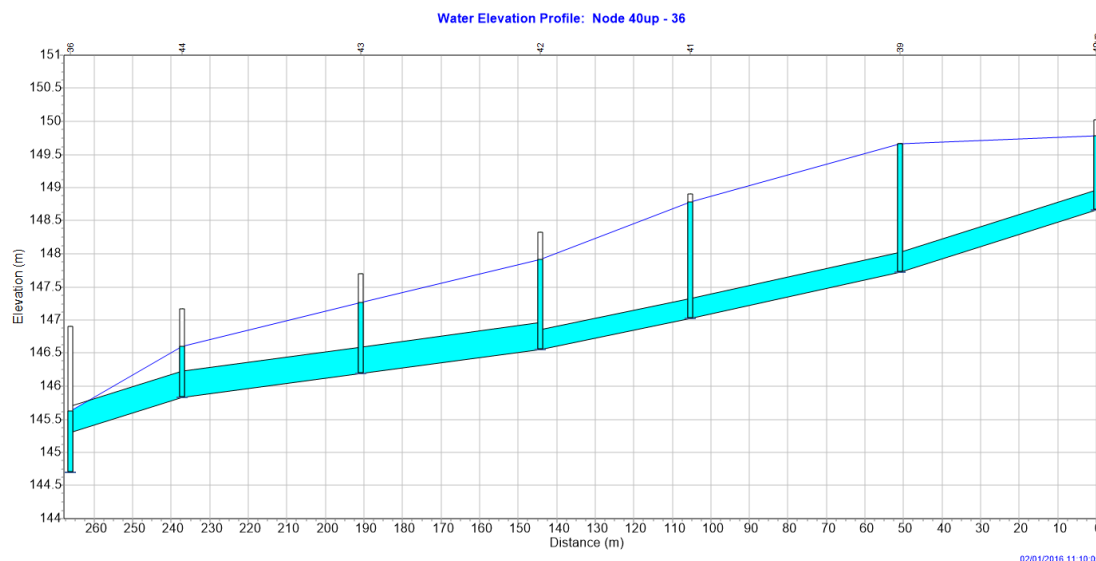


Figura 73: Representación por colores de la carga en los colectores y la inundación en los nodos, en el mapa de la cuenca de estudio (1 hora y 10 minutos después del inicio del evento de lluvia).



**Figura 74:** Vista de perfil de la rama oeste de colectores bajo el Carrer de Ponent (1 hora y 10 minutos después del inicio del evento de lluvia).

Observando el perfil del Carrer de Ponent se observa como prácticamente se ha conseguido que la línea de alturas piezométricas caiga en todo momento por debajo de la superficie de la calle. Difícilmente se va a conseguir que estos colectores no entren en carga solamente con medidas de drenaje urbano sostenible, pero la tendencia a lo largo de los escenarios de actuación muestra que la desaparición total de la inundación sí es posible.

Con las medidas incorporadas en este escenario (en cierto modo rozando la exageración) aún no se ha conseguido una rehabilitación total del sistema de drenaje urbano de la cuenca de estudio. Por este motivo se requerirá de un escenario adicional en el que se ubique la máxima superficie posible de técnicas LID que admita la cuenca, siempre bajo un criterio razonado.

## 6.5. Escenario 4

### 6.5.1. Selección y ubicación de las técnicas LID

Tratándose este del cuarto y último escenario de aplicación de técnicas de drenaje urbano sostenible, se va procurar utilizar el máximo número de elementos LID posible y ocupar con ellos la máxima superficie que admita la cuenca. Con este paso final, se podrá averiguar finalmente si el uso de técnicas LID es capaz de mitigar los problemas de drenaje urbano existentes en el litoral mediterráneo.

Por un lado se continúa incrementando el número de jardines de lluvia, zanjas de infiltración y rain barrels en las viviendas particulares. Ahora el área perteneciente a los patios interiores ocupada por jardines de lluvia será del 40%, al igual que el área ocupada por las zanjas de infiltración. De modo que un 80% del área total de patios particulares se utiliza para albergar

algún elemento LID (ya sea en superficie o enterrado). Nunca se alcanzará el valor del 100% ya que los LID no ocupan el área total de los patios; se estima que una ocupación del 80% equivale a que todas las viviendas hayan implantado LIDs. El número de rain barrels aumenta hasta 420. El área total en superficie ocupada, en este escenario, por jardines de lluvia es de 5159,54 m<sup>2</sup>. El área de tejados derivada hacia estos elementos LID sigue la misma progresión que en los escenarios anteriores; ahora es un 40% el área de tejados con patio la que se conecta a jardines de lluvia y zanjas de infiltración y un 3% del área total de tejados la que se conecta con los rain barrels.

Por otro lado se incorporan dos técnicas LID no utilizadas hasta el momento: los tejados verdes y los pavimentos permeables. Aun siendo estas dos posiblemente las medidas LID más populares, no se han utilizado hasta este último escenario debido a su difícil aplicación y elevado coste. Se ha considerado que debían reservarse para este último escenario en el que la filosofía es la de maximizar los beneficios en términos de reducción de escorrentía, sin importar los costes.

El pavimento permeable se aplica a la totalidad de calzadas y aceras de la cuenca de estudio. Se utilizan dos técnicas LID diferentes, una para las calzadas y otra para las aceras. Se considera que en las calzadas se utiliza un pavimento permeable mediante mezcla bituminosa porosa y que en las aceras se utiliza un pavimento permeable modular con bloques de hormigón y arena en las juntas. Si se supone que el Escenario 4 parte del Escenario 3 como situación inicial, se puede aprovechar la grava de la zanja de infiltración bajo el pavimento como capa de almacenamiento del pavimento permeable a instalar. El área total ocupada por pavimentos permeables será de 20157,35 m<sup>2</sup>, un 20,77% del área total de la cuenca, convirtiéndose así en la medida LID de más superficie total del estudio.

Los tejados verdes son posiblemente la técnica LID más difícil de ubicar en esta cuenca. Para ejecutar un tejado verde son muchos los aspectos que deben tenerse en cuenta; no cualquier tejado puede rehabilitarse como tejado verde. Además, la cuenca de estudio pertenece a una zona histórica del casco urbano de Granollers, por lo que las edificaciones serán antiguas y muchas no serán capaces de soportar el peso de un tejado verde. Por estos motivos, y dado a que la información de que se dispone sobre las edificaciones que se encuentran en la cuenca es muy limitada, se ha establecido un criterio aproximativo para decidir que edificios son susceptibles de poder ubicar un tejado verde. A partir del mapa de antigüedad de las edificaciones proporcionado por el ayuntamiento de Granollers (ANEXO 4) y de la ortofoto de la cuenca de estudio tomada por el Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC) se han localizado los edificios construidos posteriormente a 1980; de estos se han descartado los que disponen de tejado a dos aguas. En los tejados resultantes se ha ubicado un tejado verde para este escenario de actuación. Finalmente se han ubicado tejados verdes en 17 de las 42 sub-cuencas; el área total que estos ocupan es de 4621,59 m<sup>2</sup>. En los casos en que ha coincidido que se ubicaba un tejado verde en un área de tejado que ya vertía en alguno de los LIDs previamente existentes, se ha priorizado la construcción del tejado verde.





Figura 75: Localización de los diferentes tejados verdes dentro de los márgenes de la cuenca de estudio (sombreados en verde).

## 6.5.2. Implementación en el modelo

### 6.5.2.1. Aplicación en las sub-cuencas

En este escenario los cambios en los parámetros de impermeabilidad y ancho serán substanciales, ya que toda el área de calzada, acera y parte de la de tejados pasa a ser superficie ocupada por técnicas LID. Al ser calzadas, aceras y tejados siempre impermeables en la situación inicial, ambos parámetros disminuirán para todas las sub-cuencas que tengan un porcentaje de impermeabilidad diferente del 100%.

Las sub-cuencas adicionales creadas para albergar la zanja de infiltración bajo la calzada, en el Escenario 3, podrán ser eliminadas, ya que los pozos ahora forman parte del LID de pavimento permeable. Tanto los pavimentos permeables como los tejados verdes se aplican directamente en las sub-cuencas en las que se encuentran por medio de las ventanas “LID Group Editor” y “LID Usage Editor”; no serán necesarias más sub-cuencas auxiliares.

### 6.5.2.2. Definición de capas y parámetros. Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad se ha realizado, para el Escenario 4, bajo los mismos principios que para los escenarios anteriores. Dado que las técnicas LID implementadas en el Escenario 1 no han sido modificadas, no será necesario volver a analizar la sensibilidad de los parámetros de las celdas de bio-retención. No será así para las técnicas incorporadas en los Escenario 2 y 3, ya que ha cambiado el área que estas ocupan y, por consiguiente, la relevancia de cada uno de los parámetros de sus capas podría variar. Se analizarán además, en este escenario, los parámetros de las capas de pavimentos permeables (tanto en calzada como en acera) y de tejados verdes. El análisis de sensibilidad al completo se puede consultar en el ANEXO 3.

En las tablas resumen, a continuación, se pueden ver las propiedades de las diferentes capas que se han utilizado finalmente en la simulación del Escenario 3:

Propiedades de los parámetros de cada capa			
Elemento LID	Jardín de lluvia		
Capa superficie	Altura de berma	(mm)	200
	Volumen de vegetación	-	0
Capa de suelo	Tipo de suelo	-	Arena
	Espesor	(mm)	675

Propiedades de los parámetros de cada capa			
Elemento LID	Pozo de infiltración		
Capa superficie	Altura de berma	(mm)	0
	Volumen de vegetación	-	0
Capa de almacenamiento	Espesor	(mm)	450
	Relación de huecos	-	0,75
	Velocidad de infiltración del terreno	(mm/h)	29,972
	Factor de colmatación	-	0

Propiedades de los parámetros de cada capa			
Elemento LID	Rain barrel		
Capa de almacenamiento	Espesor	(mm)	1000
Dren	Coeficiente de dren	-	2,75
	Exponente de dren	-	0,5
	Altura de dre	(mm)	0
	Aplazamiento de liberación	(h)	1

Propiedades de los parámetros de cada capa			
Elemento LID	Desconexión de bajantes pluviales		
Capa de superficie	Altura de berma	(mm)	0
	Rugosidad de la superficie	-	0,02
	Pendiente de la superficie	(%)	20
Dren	Capacidad máxima	(mm/h)	0

Propiedades de los parámetros de cada capa			
Elemento LID	Calzada permeable		
Capa superficie	Rugosidad de la superficie	-	0,013
	Pendiente de la superficie	(%)	2
Capa de pavimento	Espesor	(mm)	125
	Relación de huecos	-	0,21
	Permeabilidad	(mm/h)	18000
	Factor de colmatación	-	0
Capa de suelo	Tipo de suelo	-	Arena
	Espesor	(mm)	0
Capa de almacenamiento	Espesor	(mm)	300
	Relación de huecos	-	0,625
	Velocidad de infiltración del terreno	(mm/h)	29,972
	Factor de colmatación	-	0

Propiedades de los parámetros de cada capa			
Elemento LID	Acera permeable		
Capa superficie	Rugosidad de la superficie	-	0,03
	Pendiente de la superficie	(%)	1
Capa de pavimento	Espesor	(mm)	125
	Relación de huecos	-	0,78
	Permeabilidad	(mm/h)	21000
	Factor de colmatación	-	0
Capa de suelo	Tipo de suelo	-	Arena
	Espesor	(mm)	100
Capa de almacenamiento	Espesor	(mm)	300
	Relación de huecos	-	0,625
	Velocidad de infiltración del terreno	(mm/h)	29,972
	Factor de colmatación	-	0

Propiedades de los parámetros de cada capa			
Elemento LID	Tejado verde		
Capa superficie	Altura de berma	(mm)	200
	Volumen de vegetación	-	0
Capa de suelo	Tipo de suelo	-	Arena
	Espesor	(mm)	150
Capa drenante	Espesor	(mm)	37,5
	Relación de huecos	-	0,55
	Rugosidad	(mm/h)	0,25

Tabla 6: Resumen de propiedades de los parámetros de las capas para los jardines de lluvia, zanjas de infiltración, rain barrels, desconexiones de bajantes pluviales, pavimentos permeables y tejados verdes del Escenario 4.

### 6.5.3. Resultados

Se considera que en el Escenario 4 se aplican el máximo número posible de técnicas LID que admite la cuenca, en base a criterios razonados. Otros tipos de disposiciones de elementos LID y de repartición en escenarios de actuación serían igual de factibles. No obstante, el beneficio obtenido en última instancia no debería diferir en gran medida entre una propuesta y otra. Por lo tanto, los resultados presentados a continuación se corresponden con la máxima rehabilitación



posible que admite el sistema de drenaje existente en la actualidad, por medio de técnicas de drenaje urbano sostenible. En este escenario final, el volumen de agua que se vierte a las calles por la incapacidad de la red de alcantarillado de recolectar la escorrentía es de 7000 litros. Se trata de una reducción de 32000 litros, o del 80% respecto al Escenario 3. Aunque finalmente se concluye que las técnicas LID no son capaces de acabar con el problema de inundación de la cuenca de estudio, se puede decir que el beneficio obtenido en términos totales y relativos es muy positivo. Comparando el valor obtenido en este escenario con la situación de partida, del Escenario 0, se ha reducido el volumen de agua vertida a las calles en 296000 litros; esto se corresponde con una reducción del 99%. En definitiva, no se elimina el problema por completo pero si en su inmensa mayoría.

Ha sido finalmente la inclusión de los pavimentos permeables y de los tejados verdes lo que ha conseguido almacenar e infiltrar la mayor cantidad de agua. De modo que este último recurso ha sido el que ha demostrado ser el más eficaz. Sin embargo, esta incorporación viene a costa de la ejecución de casi 25000 m<sup>2</sup> de LID, más de una cuarta parte de la superficie total de la cuenca. Además, la construcción de pavimentos permeables y tejados verdes altera notablemente las dinámicas ciudadanas y supone un elevado desembolso económico. Se ha alcanzado, casi en su totalidad, el objetivo, pero ello ha implicado llevar al extremo la apuesta por el drenaje sostenible. Llegar al nivel de incorporación de elementos LID de este escenario de actuación resulta impensable, al menos a día de hoy.

Se muestra a continuación, para el escenario final, como se comportan los pozos de registro y colectores en el instante más desfavorable, con el mapa ya utilizado en los escenarios anteriores:

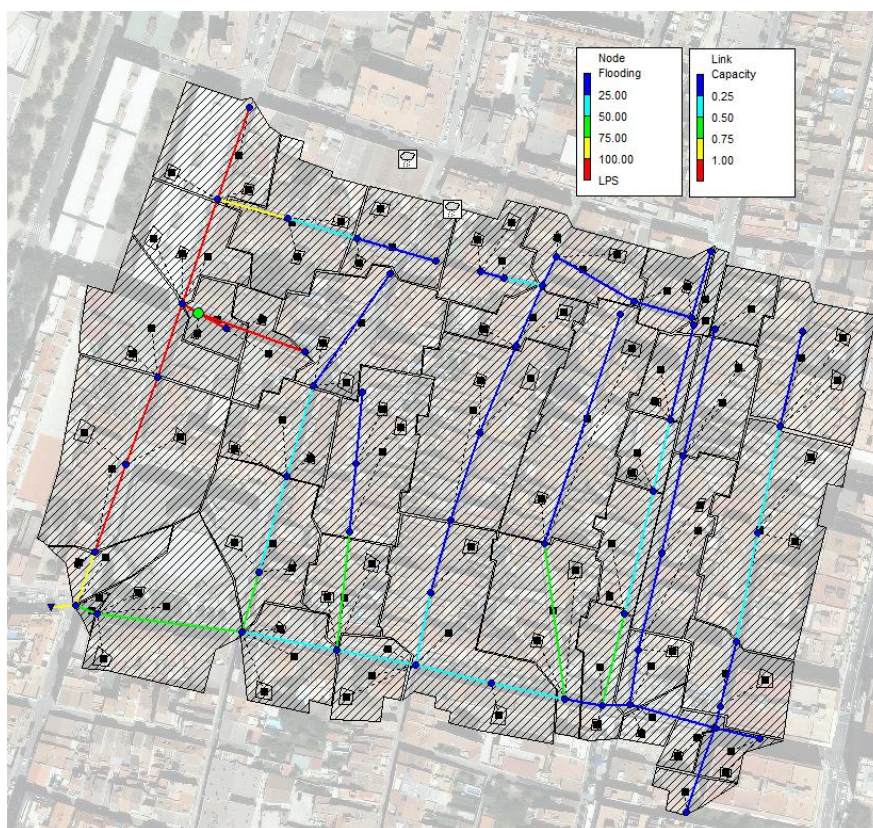


Figura 76: Representación por colores de la carga en los colectores y la inundación en los nodos, en el mapa de la cuenca de estudio (1 hora y 10 minutos después del inicio del evento de lluvia).

Se confirma el problema grave de capacidad del eje de colectores de Carrer de Ponent; posiblemente con un evento de lluvia de mucho menor periodo de retorno continuaría sin tener capacidad suficiente. Se observa en la vista de perfil que dichos colectores están fuera de peligro de desborde, aunque siguen estando claramente infra-dimensionados. Son ahora 12 de 57 solamente los colectores que entran en carga en algún momento; eran 29 en el Escenario 0. Los pozos de registro que desbordan son ahora 5 de 58, comparados con los 13 del Escenario 0. De estos 5 pozos, el del Carrer Almogàvers expulsa 6000 de los 7000 litros totales que inundan el sistema.

Este escenario final de aplicación de medidas de drenaje urbano sostenible no representa una situación de funcionamiento ideal del sistema de drenaje de la cuenca. Aun así, si partiendo de este escenario, se ejecutan unas simples modificaciones de rehabilitación que se podrían catalogar como convencionales, sí se podría conseguir erradicar por completo los problemas de drenaje urbano relacionados con la cantidad de agua. Por ejemplo, eliminando el pozo de registro del Carrer Almogàvers, que es totalmente innecesario dada la proximidad del pozo de registro más cercano.

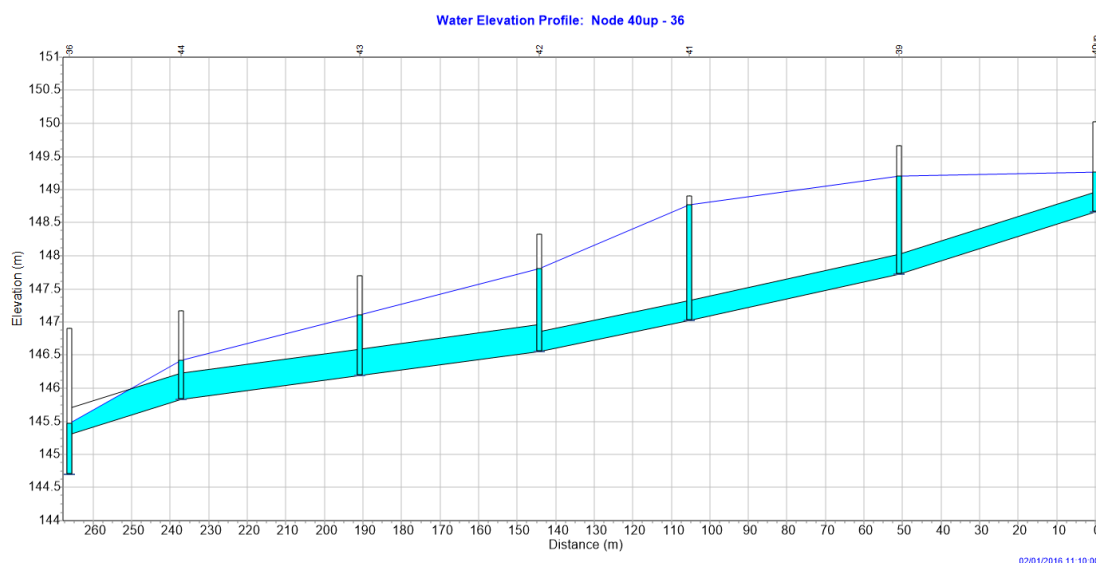


Figura 77: Vista de perfil de la rama oeste de colectores bajo el Carrer de Ponent (1 hora y 10 minutos después del inicio del evento de lluvia).

## 6.6. Comparativa de resultados entre los diferentes escenarios

Hasta el momento, en este capítulo se ha comentado el razonamiento y procedimiento que se ha seguido para ejecutar los diferentes escenarios de actuación mediante SWMM5; así como el comportamiento del sistema de drenaje, en líneas generales, para cada uno de ellos. Una vez conocidas las particularidades de cada escenario de aplicación se van a presentar, ahora con más detalle, los resultados obtenidos con el objetivo de extraer el máximo de información posible de

estos. La finalidad de este apartado es, además, poder comparar los diferentes escenarios al mismo tiempo. De este modo se podrá dar una respuesta más fundamentada a las preguntas que se planteaban al comienzo del estudio.

### 6.6.1. Resultados en relación a la cantidad de agua

#### 6.6.1.1. Hidrograma de salida

Como primer resultado se presentarán los resultados obtenidos a la salida de la red de colectores para cada uno de los escenarios de actuación. Se muestran a continuación el propio hidrograma de manera gráfica, así como una tabla resumen de los valores numéricos:

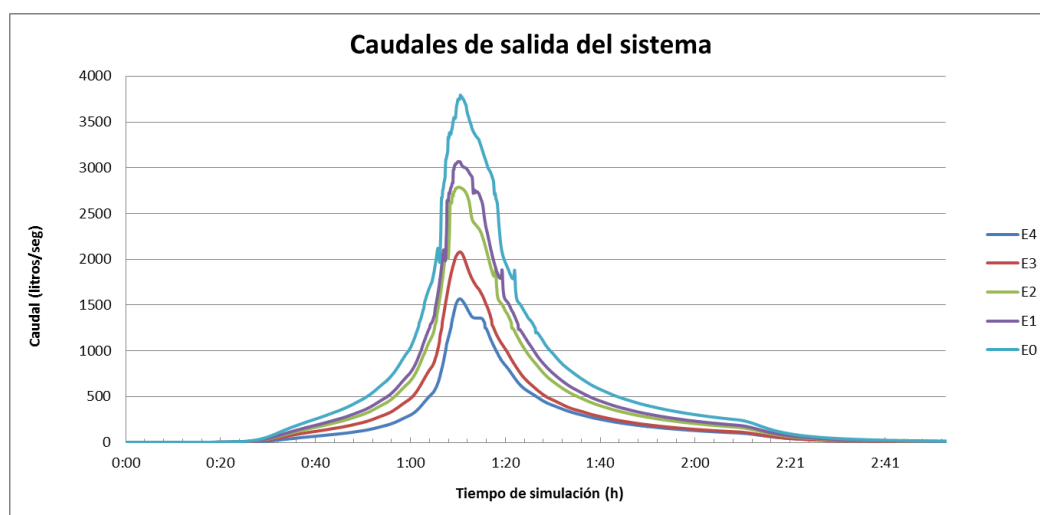


Figura 78: Hidrogramas de salida de la red de drenaje convencional para cada uno de los escenarios de actuación planteados.

Escenario de actuación	Caudal medio	Caudal pico	Volumen total	Reducción de pico	Reducción de volumen
	(litros/seg)	(litros/seg)	(litros x10 <sup>6</sup> )	(%)	(%)
E0	1047,32	3795,31	6,077	-	-
E1	850,12	3068,39	4,736	19,15	22,07
E2	733,86	2788,73	4,205	26,52	30,80
E3	476,6	2080,96	2,995	45,17	50,72
E4	352,01	1568,58	2,322	58,67	61,79

Tabla 7: Resumen de los resultados de caudales medios, pico y volúmenes totales para cada uno de los escenarios de actuación planteados.

Se observa claramente cómo el volumen evacuado por el sistema de drenaje en conjunto se reduce a medida que se insiste en la implantación de medidas LID. Como se comentó en la

sección 3.3.1. *Cantidad de agua*, la implantación de elementos LID busca tanto la reducción del volumen total evacuado, como la reducción y aplazamiento del pico del hidrograma de salida. En el caso que aquí se plantea, se consiguen todos los puntos mencionados con excepción del desplazamiento del pico de escorrentía. El instante de máxima liberación de agua de lluvia, en el punto de salida de la red de alcantarillado, coincide en todos los casos (1 hora y 10 minutos después del inicio de la simulación aproximadamente); se obtiene un cierto “aplanamiento” del hidrograma, pero incluso en el Escenario 4, se observa aún un marcado pico que coincide en el tiempo con el de los demás escenarios.

La explicación a este fenómeno puede residir en la decisión de no incorporar el dren de salida opcional en celdas de bio-retención, zanjas de infiltración y pavimentos permeables. Al no existir un desagüe en los elementos LID que más caudal desplazan de las calles, conectado con la red de colectores, no se mide el freno que estos provocan en la evacuación de escorrentía del sistema. Estos datos presentados solamente miden la reducción de volumen, por parte de estos tres elementos LID, ya que el volumen infiltrado desaparece de la ecuación; si en vez de infiltrarse este volumen se derivara a sistema de drenaje existente, una vez tratado por el LID, aparecería en el hidrograma de salida desplazado varios minutos en comparación con el pico de caudal. Si fuera posible obtener un hidrograma de salida del sistema global, que incorporara el volumen perdido por infiltración (y evaporación, si se hubiese tenido en cuenta) al evacuado por los colectores, sí se observaría el progresivo aplazamiento del pico.

Salvando este punto, es notorio que los resultados presentados demuestran una disminución muy importante del caudal transportado por los colectores. Cada uno de los escenarios elimina buena parte de la escorrentía total generada, y de manera más importante, se reduce el pico de caudal en un 61%. Este dato resulta francamente decisivo, ya que demuestra que las técnicas de drenaje urbano sostenible no solo son capaces de aportar beneficios en eventos de lluvia de baja o moderada intensidad, sino que también realizan una importante función ante lluvias torrenciales. De modo que en los minutos en que los colectores se ven más solicitados es cuando mejor actúan.

#### 6.6.1.2. *Infiltración*

La infiltración, como se viene comentando a lo largo del trabajo, es el principal proceso por medio del cual las técnicas de drenaje urbano sostenible pueden colaborar en la reducción de los problemas de inundaciones. A continuación se presentan los resultados obtenidos en cuanto a la infiltración producida en la cuenca de estudio, para cada uno de los escenarios de actuación:

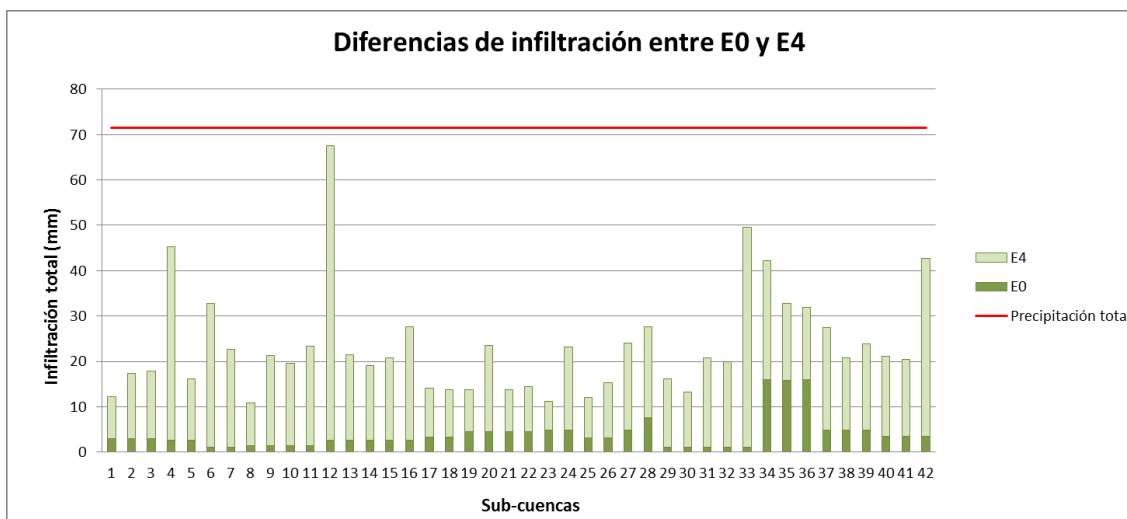


Figura 79: Diferencia de infiltración producida entre los escenarios de actuación 0 y 4 para cada una de las sub-cuencas que forman la cuenca de estudio.

Los datos que se presentan en la gráfica anterior demuestran la gran capacidad que tienen las técnicas LID de devolverle su drenaje natural a las cuencas urbanas. Las diferencias de volúmenes infiltrados entre el Escenario 4 y el Escenario 0 son extraordinarias. Muy posiblemente una gran parte de la diferencia se debe al muy buen funcionamiento de los pavimentos permeables y tejados verdes comentado en el apartado 6.5. *Escenario 4*. Esto se ve reflejado en los resultados para las sub-cuencas 12 y 33 de la figura anterior; se trata de sub-cuencas muy pequeñas que, en el Escenario 4, se encuentran prácticamente en su totalidad cubiertas de pavimento permeable. Por este motivo son las que presentan las diferencias más exageradas.

Aun así, continúa tratándose de un resultado muy positivo, ya que la infiltración media se multiplica por 4 entre los Escenarios 0 y 4. Además, la infiltración en el Escenario 4 es más de una cuarta parte del volumen total de agua precipitado. Cabe destacar que en esta gráfica no se están considerando las pérdidas por infiltración en las zanjas de infiltración, que se encuentran en sub-cuencas auxiliares y por lo tanto su colaboración no se contabiliza en las sub-cuencas originales.

### 6.6.1.3. Escorrentía

Los resultados de escorrentía van estrechamente relacionados con los de infiltración. Al ser la infiltración el único proceso considerado en el estudio por el que se puede reducir la escorrentía de la cuenca, a más infiltración menos escorrentía. A continuación se presentan los resultados obtenidos en cuanto a la circulación de agua en superficie:

Escenarios de actuación	Precipitación	Escurrentía media	Pico de escurrentía medio	Coefficiente de escurrentía medio
	(mm)	(mm)	(litros/seg)	-
E0	71,56	65,84	116,14	0,92
E1	71,56	48,31	90,68	0,68
E2	71,56	45,67	85,53	0,64
E3	71,56	48,62	91,02	0,68
E4	71,56	23,89	51,32	0,33

Tabla 8: Resumen de los resultados de escurrentía para cada uno de los escenarios de actuación planteados.

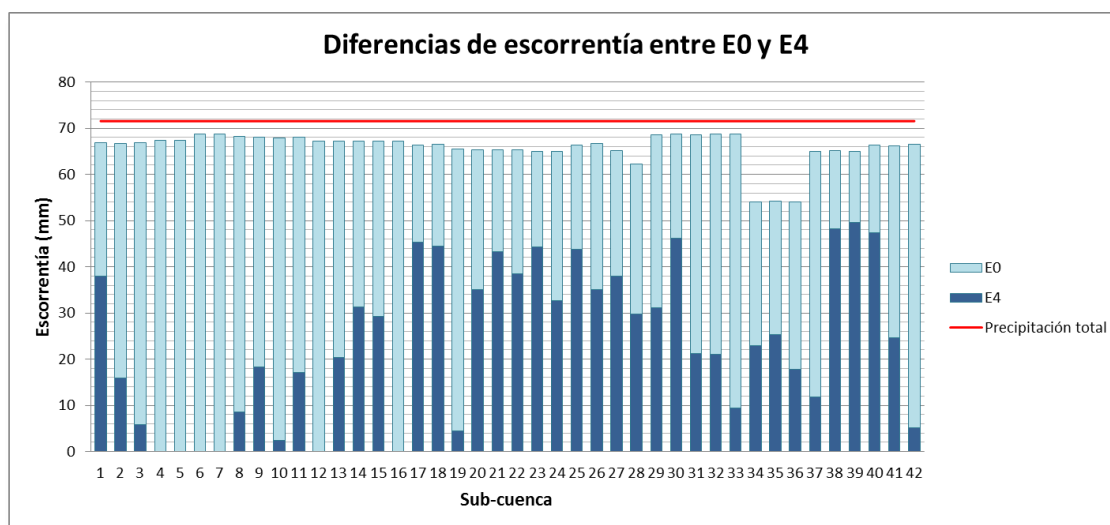


Figura 80: Diferencia en escurrentía generada entre los escenarios de actuación 0 y 4 para cada una de las sub-cuencas que forman la cuenca de estudio.

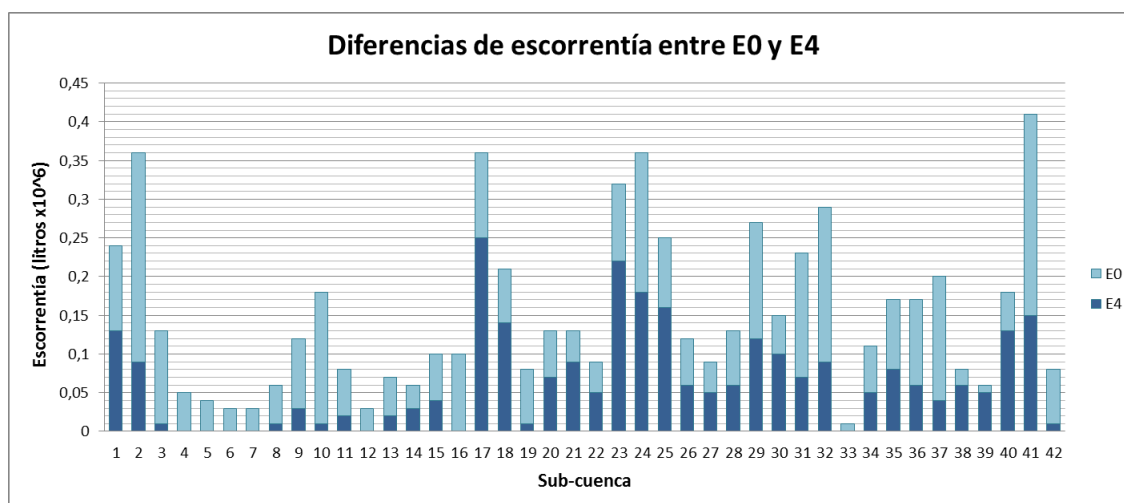


Figura 81: Diferencia en escurrentía generada entre los escenarios de actuación 0 y 4 para cada una de las sub-cuencas que forman la cuenca de estudio.



Las dos gráficas anteriores presentan prácticamente el mismo resultado; en una de ellas se muestra la escorrentía generada en los Escenarios 0 y 4 en mm, comparada con la precipitación caída y la otra muestra las diferencias en volumen total.

Se observa cómo, para el Escenario 0, el espacio entre la línea roja (que representa los mm de lluvia caída) y las barras que cuantifican la escorrentía, se corresponden con los mm de infiltración presentados en el apartado anterior. En cambio para el Escenario 4 existen ciertas diferencias. Estas se deben en parte a la infiltración no cuantificada mencionada previamente y al volumen de agua que pueda haber quedado retenido en superficie. Como parece lógico, la diferencia es más marcada en las pequeñas sub-cuencas que en el Escenario 4 tienen gran parte de su superficie cubierta por elementos LID.

La representación de la escorrentía en litros totales ilustra la relevancia de cada una de las sub-cuencas con respecto al global de la cuenca. El valor absoluto clarifica los datos relativos recientemente comentados; el volumen total resulta útil para identificar las sub-cuencas más problemáticas. Por ejemplo, cabría pensar, vistos los resultados en mm, que las sub-cuencas 38, 39 y 40 son una parte principal del problema de inundación de las calles. No obstante se comprueba que el volumen total que circula en superficie en dichas sub-cuencas ronda los 50.000 litros, que dista mucho de los 250.000 litros que se dan en la sub-cuenca 17.

Por otro lado, si se consulta la tabla resumen expuesta anteriormente en este apartado, se comprueba cómo la escorrentía media, el pico de escorrentía y el coeficiente de escorrentía caen drásticamente, sobretudo, al llegar al Escenario 4. Estos datos resaltan el importante empujón que pavimentos permeables y tejados verdes dan al funcionamiento global del sistema de drenaje. Sin embargo, llaman la atención los datos referentes al Escenario 3; se obtienen resultados más desfavorables que en el Escenario 2, lo que carece de sentido dados los resultados ya presentados y comentados. La escorrentía en el Escenario 3 debería, como mínimo, reducirse con respecto al Escenario 2. La explicación a este fenómeno reside, posiblemente, en un error de cálculo numérico que ha presentado SWMM5 a lo largo de todo el estudio, al cual no se le ha podido encontrar explicación. La técnica LID “Rooftop Disconnection” presenta en cada cálculo en el que interviene un error de continuidad muy elevado, causado por una cantidad desproporcionada de agua acumulada en la superficie del LID al final de la simulación. Se trata de una cantidad de agua mucho mayor a la de lluvia, por lo que se trata de algún tipo de error de cálculo. Esta cantidad de agua en superficie puede estar alterando los resultados de escorrentía; el Escenario 3 es, con diferencia, el que más cantidad de superficie tiene asociada a este tipo de elemento LID y por lo tanto es el más afectado por el error. La escorrentía de los Escenarios 2 y 4 puede estar asimismo sobre-estimada, pero al tratarse de una superficie afectada mucho menor, se ignorarán estos efectos.

#### **6.6.1.4.    *Entrada en carga de los colectores***

Los colectores que constituyen la red de drenaje actual de la cuenca de estudio son conductos convencionales de hormigón, diseñados para funcionar por gravedad. Se deberá evitar por lo tanto, en la medida de lo posible, su entrada en carga.

Como se ha venido comentando en apartados anteriores de este capítulo de resultados, uno de los principales problemas detectados en algunas zonas de la red de alcantarillado de la cuenca

de estudio, es la entrada en carga de una buena parte de los colectores. A medida que se avanza en la ubicación de técnicas LID, estos efectos van desapareciendo, pero algunos problemas persisten hasta el Escenario 4. A continuación se va a cuantificar la gravedad del problema con la ayuda de las siguientes gráficas:

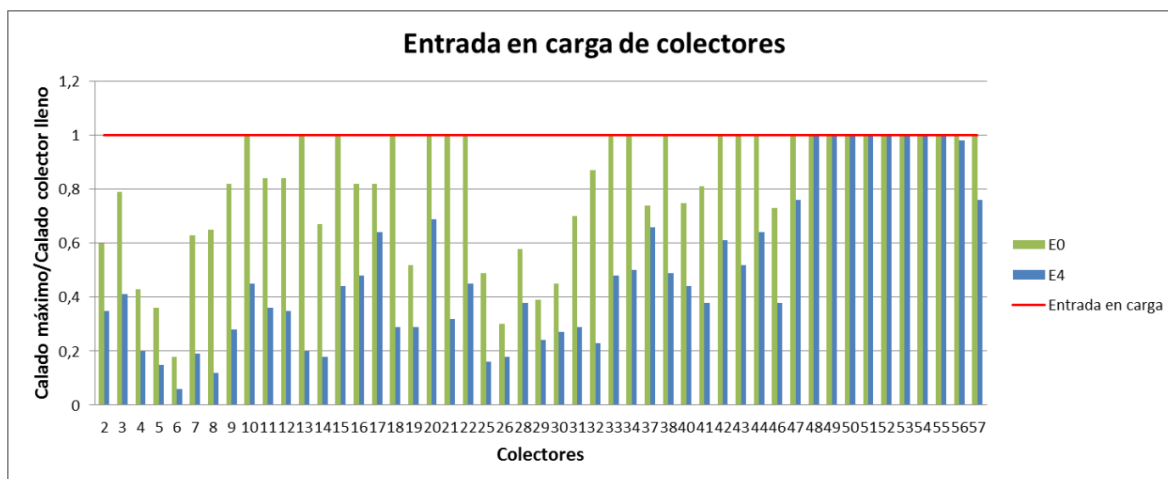


Figura 82: Ratio entre caudal máximo y caudal admisible para cada uno de los colectores de la cuenca de estudio, para Escenarios 0 y 4.

En estas imágenes se representa lo lejos que se encuentra cada uno de los colectores de entrar en carga, para los Escenario 0 y 4. Se han suprimido de la gráfica los colectores que circulan vacíos en todo momento; por este motivo no coincide el número total de conductos con los mencionados en otros apartados.

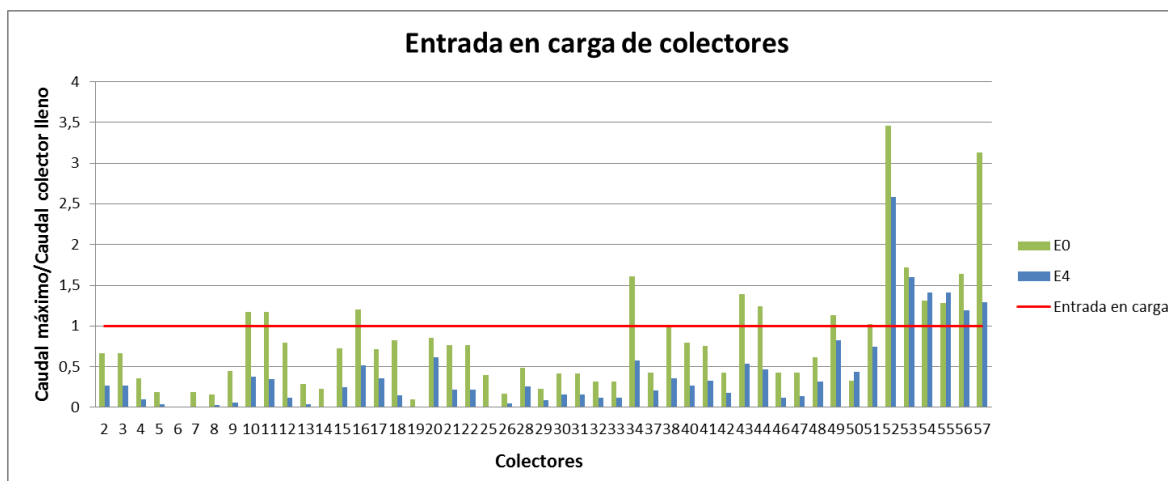


Figura 83: Ratio entre caudal máximo y caudal admisible para cada uno de los colectores de la cuenca de estudio, para Escenarios 0 y 4.

En la primera se representa la relación entre el calado máximo que se da a lo largo de la simulación y el máximo admitido por el colector. Por lo tanto es imposible que se supere el

valor de 1; que el ratio se acerque a 1 indica que posiblemente el colector entre en carga. Lo primero que llama la atención es la gran disparidad de calados en los colectores; esto ya denota un error de diseño de la red, que no consigue que se reparta la esorrentía entre los colectores sino que concentra gran parte de ella en unos pocos. El dato positivo es que la mayor parte de los colectores que se llenan en el Escenario 0, reducen en gran medida su calado en el Escenario 4.

La segunda gráfica representa el ratio entre el caudal máximo que se da a lo largo de la simulación y el máximo que admite el colector. En este caso puede superarse el valor de 1; si así es, el colector entrará en carga, aunque el hecho de que no se alcance el valor de 1 no implica que el colector no haya entrado en carga, ya que el caudal que se calcula es el caudal medio para todo el colector y este puede haber entrado en carga solamente en uno de sus extremos. En cualquier caso, esta imagen nos proporciona información de a qué nivel es problemática la entrada en carga de un colector. Se identifican algunos colectores que, incluso en el Escenario 4, superan un valor de ratio de 1,5 e incluso 2,5; estos conductos están muy lejos de poder aliviar la carga que soportan mediante la aplicación de técnicas LID. Se trata de los colectores bajo el Carrer de Ponent y el Carrer Almogàvers; una zona que ya se había identificado como la más problemática de la cuenca de estudio.

Los colectores que entran en carga en el Escenario 4, tanto los identificados como los que no se identifican con ninguno de los dos ratios graficados en este apartado, se presentan en la tabla a continuación:

Colector	Horas lleno en los dos extremos	Horas lleno aguas arriba	Horas lleno aguas abajo	Horas por encima de flujo normal	Horas con capacidad limitada
37	0,01	0,01	0,04	0,01	0,01
47	0,01	0,01	0,15	0,01	0,01
48	0,07	0,07	0,15	0,01	0,01
49	0,15	0,15	0,2	0,01	0,01
50	0,11	0,11	0,2	0,01	0,01
51	0,2	0,2	0,21	0,01	0,01
52	0,2	0,21	0,2	0,3	0,19
53	0,2	0,2	0,2	0,23	0,2
54	0,16	0,16	0,16	0,19	0,16
55	0,1	0,16	0,1	0,19	0,1
56	0,01	0,1	0,01	0,14	0,01
57	0,01	0,01	0,01	0,13	0,01

Figura 84: Colectores que entran en carga en el Escenario 4.

Solamente los colectores 37 y 47 no han sido identificados por ninguna de las dos gráficas anteriores. Ambos se encuentran lejos de ser los más problemáticos.

#### 6.6.1.5. Velocidades

La reducción de la velocidad del agua al circular por los colectores resulta interesante en la medida que ayude a una evacuación más pausada de la escorrentía en la cuenca. El objetivo es la reducción de los picos de escorrentía en superficie, que generan grandes caudales y velocidades y pueden ser dañinos para bienes y personas, no en los colectores.

El problema de las altas velocidades en colectores está asociado habitualmente a problemas de abrasión, más que con los picos de escorrentía o volúmenes de inundación (que son los temas que aquí se tratan). Además, el hormigón acepta velocidades de 6 a 8 m/s sin problemas y, según las figuras siguientes, los valores se mantienen así.

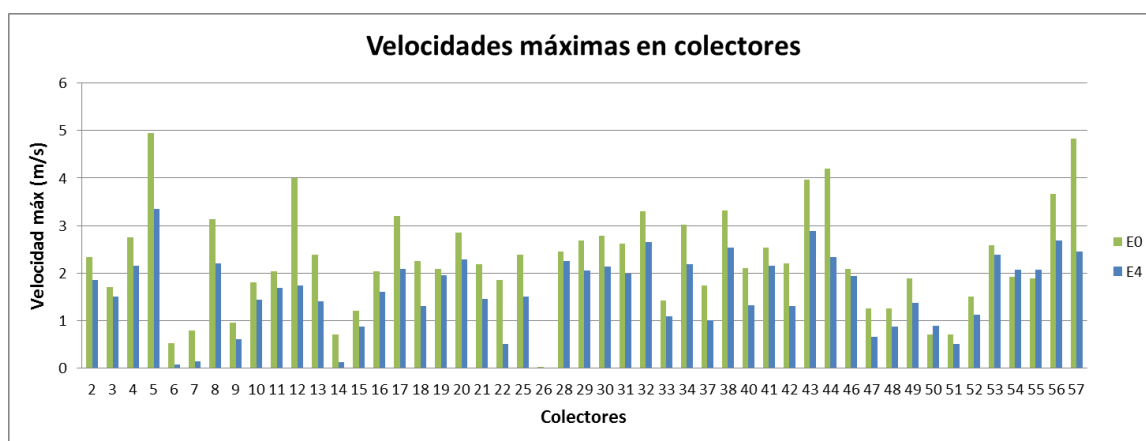


Figura 85: Velocidades en cada uno de los colectores de la cuenca de estudio para los Escenarios 0 y 4.

La reducción tanto de calado como de caudal comentada en el apartado anterior hace que las velocidades sufran una reducción mucho más moderada. Incluso en algunos de los colectores más problemáticos se produce un ligero incremento de velocidad. De todos modos, la reducción de las velocidades no es uno de los objetivos principales que se persiguen con el uso de técnicas de drenaje urbano sostenible. A nivel informativo se presenta la reducción de velocidades entre los Escenarios 0 y 4:

#### 6.6.1.6. Inundación

Por último, se van a presentar los resultados referentes a la inundación. El objetivo final, en lo que se refiere a cantidad de agua, es que el sistema de drenaje urbano sea eficiente y que consiga evacuar la totalidad de la escorrentía generada en las zonas impermeables de la ciudad. Lo que comúnmente se denomina agua de inundación proviene realmente de dos fuentes distintas: Si los colectores circulan en capacidad y la lámina de agua sube por los pozos de registro, esta agua inundará las calles; pero por otro lado, cuando el caudal de escorrentía que circula en superficie es tan elevado que los imbornales de captación son insuficientes para recolectarlo, este volumen de agua colabora a la inundación de las calles. En este trabajo, se está suponiendo que el sistema de captación de escorrentía de las sub-cuencas es lo suficientemente efectivo como para conducir la escorrentía superficial hacia la red de colectores. Por este motivo

se deberá tener en cuenta que los resultados de inundación pueden estar infra-estimados; solamente tienen en cuenta el volumen de agua que desborda por los pozos de registro.

Se presentan a continuación dos imágenes explicativas de cómo se sucede la inundación en cada uno de los escenarios de actuación:

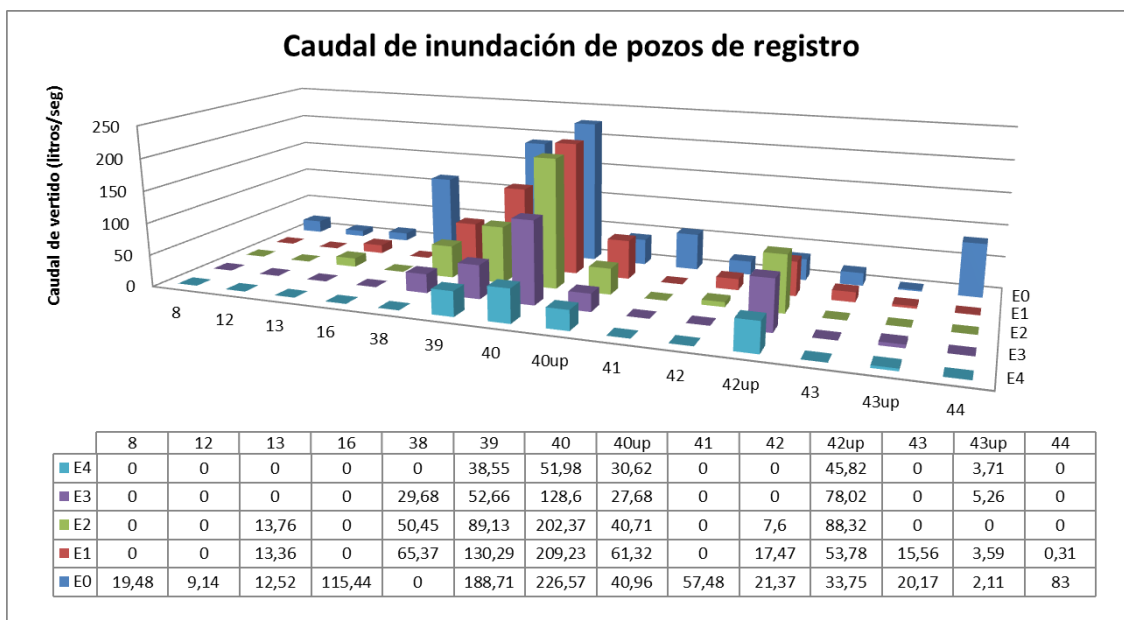


Figura 86: Gráfica 3D que muestra el caudal máximo de inundación para cada uno de los pozos que vierte agua a las calles, a lo largo de la simulación del caso de estudio, para cada uno de los escenarios.

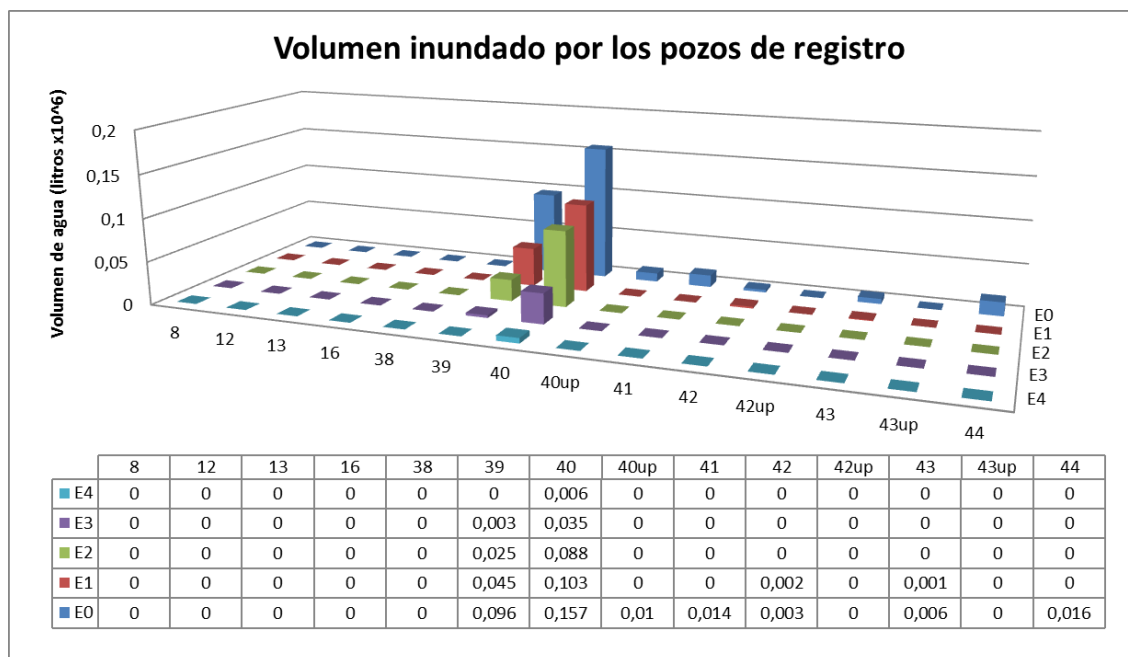


Figura 87: Gráfica 3D que muestra el volumen total de inundación liberado por cada uno de los pozos que vierte agua a las calles, a lo largo de la simulación del caso de estudio, para cada uno de los escenarios.

Los resultados de inundación ya se han venido comentando a medida que se iban introduciendo los diferentes escenarios de actuación. Los volúmenes totales de inundación comentados en cada escenario se obtienen sumando las filas de la tabla que aparece en la gráfica “Volumen inundado por los pozos de registro”. Aun así, se presentan estas dos imágenes con el objetivo de ahondar en el hecho de que los problemas de la red de colectores se encuentran muy localizados. Es cierto que son varios los pozos de registro que en algún momento vierten agua a las calles, como se demuestra en la gráfica “Caudal de inundación de los pozos de registro”, pero los nodos de la red que realmente colaboran en el volumen total expulsado son principalmente dos: el más desfavorable en el Carrer Almogàvers (pozo 40) y uno de los pozos del Carrer de Ponent (pozo 39). Aproximadamente la mitad del volumen de inundación del Escenario 0 corresponde al pozo 40, y prácticamente su totalidad en el Escenario 4. Además, queda más que patente, a la vista de las imágenes anteriores, el considerable aminoramiento del problema de inundación a medida que se aplican las técnicas de drenaje urbano sostenible.

### 6.6.2. Resultados en relación a la calidad del agua

Los resultados que proporciona SWMM5 en lo que se refiere a calidad del agua no son tan completos como lo son para la cantidad. La información que se puede recopilar es menos variada y se ciñe sobre todo a resumir el balance de la cantidad de contaminantes en el sistema de drenaje global. Los contaminantes que se han estudiado en este trabajo son Sólidos Totales Suspendidos (SS), Demanda Bioquímica de Oxígeno a los 5 días (DBO5) y amonio (NH4) como se explica en el apartado 5.2.3. *Cálculo de la calidad del agua*.

#### 6.6.2.1. Balance de masa de contaminantes

Se presenta a continuación una tabla resumen de la reducción de contaminantes que se da debido a la implantación de medidas LID, a medida que se avanza en los escenarios. Los datos incluidos son:

- La masa total de contaminante que se saca del sistema de drenaje por el punto de salida de la red de colectores: Este valor representaría, si se estudiara una red de drenaje al completo, la cantidad de contaminante que se está vertiendo a la masa de agua receptora o a la estación depuradora correspondiente.
- La masa total de contaminante asociada al volumen de inundación: Es importante tener en cuenta este dato, ya que el contaminante que se pierde en este proceso acaba depositado en las calles.
- La masa total de contaminante acumulada en el sistema: Este valor tiene en cuenta tanto la masa de contaminante que queda depositada en los colectores una vez finalizada la simulación, la masa aun acumulada en los elementos LID y la masa que ha quedado retenida en superficie.



Escenarios de actuación	SS			DBO5			NH4		
	Salida del sistema	Pérdidas por inundación	Acumulación final en el sistema	Salida del sistema	Pérdidas por inundación	Acumulación final en el sistema	Salida del sistema	Pérdidas por inundación	Acumulación final en el sistema
	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)
E0	405,76	2,249	0,428	311,268	0,138	0,474	15,242	0,183	0,074
E1	306,085	1,108	0,441	234,524	0,058	0,498	11,798	0,092	0,077
E2	252,081	0,834	1,596	191,781	0,047	0,515	9,997	0,069	0,163
E3	163,438	0,291	4,818	123,622	0,019	0,566	6,921	0,024	0,145
E4	108,338	0,049	5,022	80,942	0,003	0,526	5,099	0,004	0,135

Tabla 9: Resumen del balance de masa de contaminantes en la cuenca de estudio, para cada uno de los escenarios de actuación planteados.

Se observa como la masa total vertida por la red de alcantarillado sufre reducciones muy importantes, de hasta 4 veces su valor inicial para el Escenario 4 en el caso de los SS. Mayor es aún la reducción en los contaminantes expulsados por la inundación en los pozos de registro; aunque desde un principio ya se trata de un volumen de contaminantes poco importante. No obstante, la cantidad de contaminantes acumulados en el sistema crece en lugar de disminuir. Esto se debe a que, como ya se comentó en el apartado 6.6.1.2. *Infiltración*, al final de la simulación, aún queda un volumen importante de agua retenido en los elementos LID. Por lo tanto, a más volumen de retención por parte de estos, más masa total de contaminantes se queda en el sistema al final de la simulación.

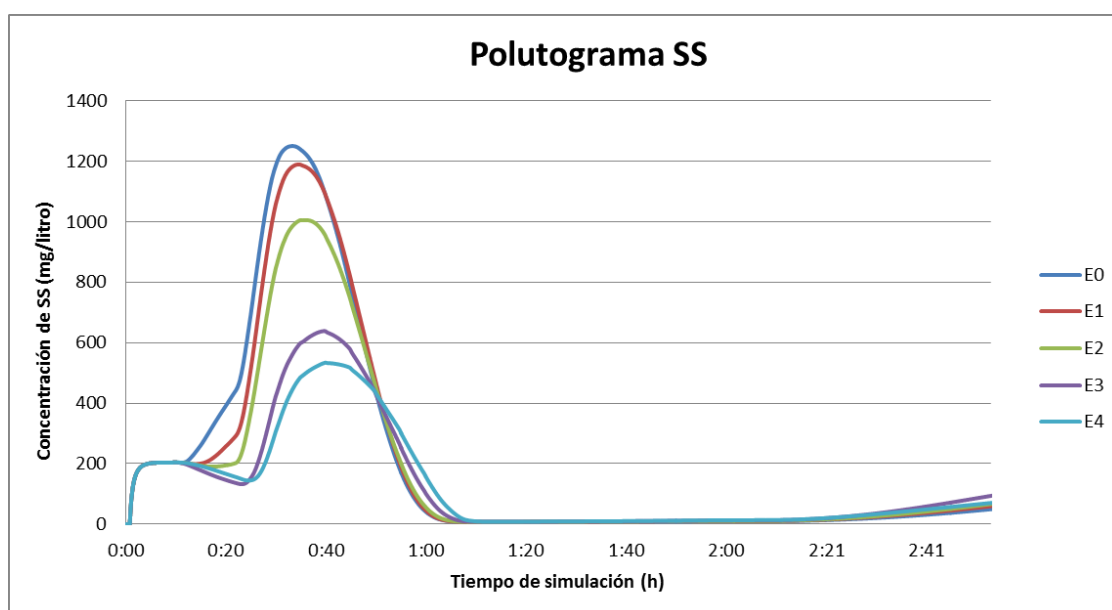


Figura 88: Polutograma de SS en el punto de salida de la red de colectores, para cada uno de los escenarios de actuación propuestos.

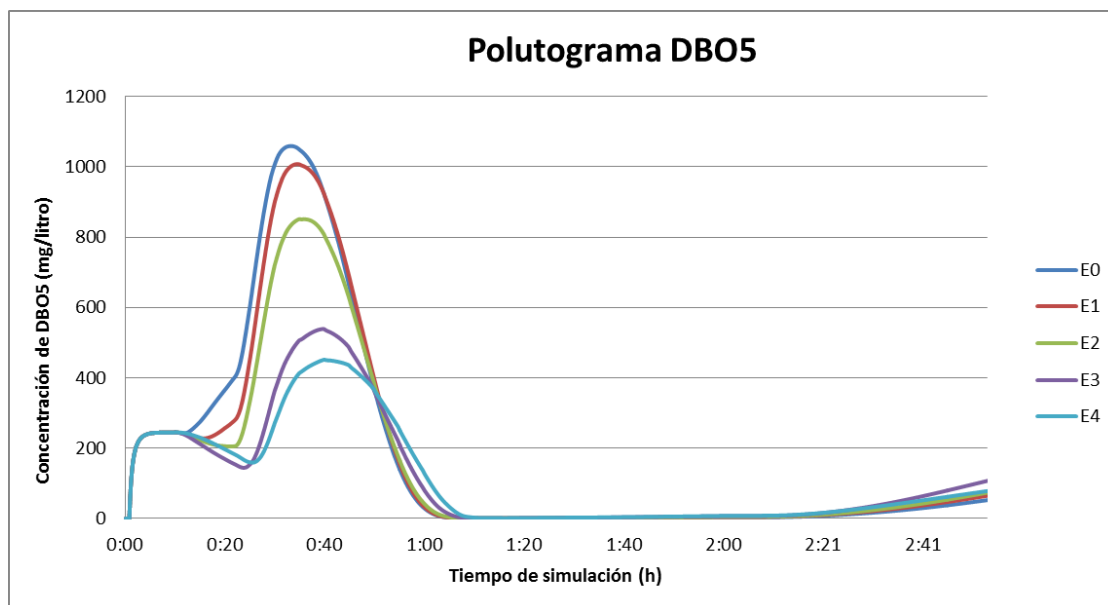


Figura 89: Polutograma de DBO5 en el punto de salida de la red de colectores, para cada uno de los escenarios de actuación propuestos.

Por otro lado, resulta interesante estudiar los polutogramas de cada uno de los contaminantes en el punto de salida de la red de colectores, para cada escenario de actuación. Se observa en los tres casos una tendencia similar:

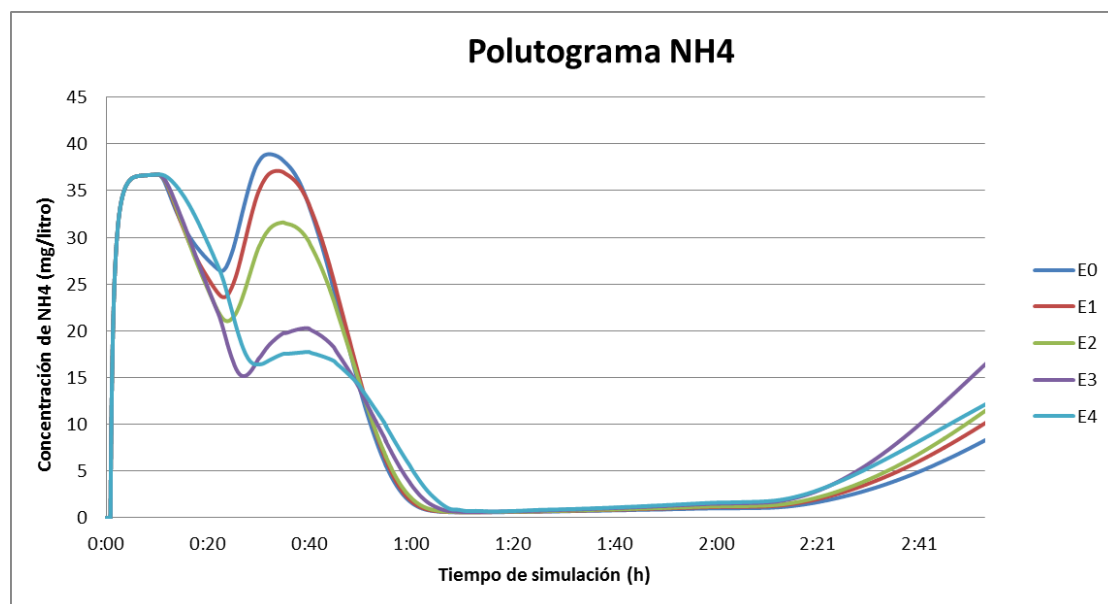


Figura 90: Polutograma de NH4 en el punto de salida de la red de colectores, para cada uno de los escenarios de actuación propuestos.

Se distingue claramente el fenómeno del “firstflush”, ya que en los tres casos el pico de concentración de contaminante se da en los primeros minutos de simulación. Esto se debe a que

los contaminantes depositados y acumulados en las calles y los colectores durante el periodo seco previo a la lluvia son arrastrados por los primeros caudales de escorrentía. Durante los primeros minutos de lluvia aún no se han generado grandes volúmenes de escorrentía, luego la concentración de contaminantes en el “firstflush” será elevada. Los picos de concentración decrecen muy rápidamente y se reducen prácticamente a 0 en un instante que coincide con el pico de caudal de escorrentía (se puede comprobar en las gráficas del apartado 6.6.1.1. *Hidrograma de salida*); a mayor caudal, menor concentración. Se comprueba así que el “firstflush” es la principal fuente de contaminación de la escorrentía superficial urbana.

Las concentraciones de contaminante se reducen a medida que se aplican más técnicas de drenaje urbano sostenible, pero no lo hacen de manera uniforme a lo largo de toda la simulación. Se pueden observar dos picos de concentración claramente diferenciados; el primero de ellos se mantiene constante en todos los escenarios y el segundo es el que se reduce con el uso de técnicas LID. La explicación de este hecho es que el primer pico se corresponde con la contaminación depositada en los colectores durante el periodo seco previo al evento de lluvia; esta concentración de contaminante es totalmente ajena a las técnicas LID que se apliquen en la superficie. En cambio el segundo pico de contaminación proviene de los contaminantes depositados en superficie y del aporte de la propia agua de lluvia. Parte del caudal de escorrentía que transporta estos contaminantes va a ser tratado por los elementos LID y por ello se van reduciendo los picos de concentración en cada escenario.

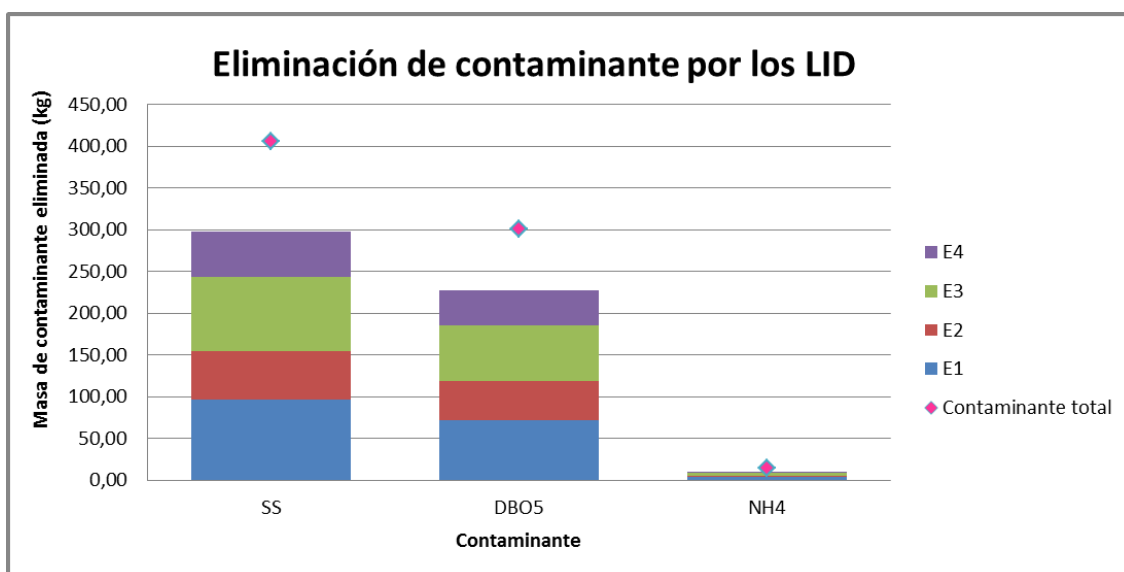
Cabe recordar que el sistema de drenaje de la cuenca de estudio es unitario, y por lo tanto mientras se evacúan los caudales de escorrentía pluvial se transportan también las aguas residuales domésticas. Durante la franja de tiempo en la que circula agua de origen pluvial por los colectores, los contaminantes provenientes de las aguas de saneamiento se diluyen en los grandes caudales de escorrentía y por ello la concentración se reduce drásticamente. Pero en el momento en que el transporte de escorrentía pluvial cesa, se observa como de nuevo crecen las concentraciones de contaminante.

#### 6.6.2.2. Colaboración de las técnicas LID

Se ha detectado una importante reducción de la cantidad total de contaminante que se transporta en la red de drenaje existente. A continuación se mostrará qué cantidad total de contaminantes es la que tratan los elementos LID:

Escenario	Eliminación de SS por LID		Eliminación de DBO5 por LID		Eliminación de NH4 por LID	
	(kg)	(%)	(kg)	(%)	(kg)	(%)
E1	96,41	23,77	72,07	24,01	3,43	23,77
E2	155,06	38,23	118,51	39,48	5,41	37,54
E3	242,77	59,85	184,76	61,55	8,52	59,08
E4	297,45	73,33	227,23	75,70	10,39	72,06
<b>Contaminante total</b>	<b>405,65</b>	<b>100,00</b>	<b>300,18</b>	<b>100,00</b>	<b>14,42</b>	<b>100,00</b>

Tabla 10: Resumen de la cantidad de contaminantes tratada por los elementos LID para cada uno de los escenarios de actuación planteados.



**Figura 91:** Representación gráfica de de la cantidad de contaminantes tratada por los elementos LID para cada uno de los escenarios de actuación planteados.

La tabla y gráfica anteriores ofrecen la misma información; qué cantidad de contaminante tratan los elementos LID en cada uno de los escenarios. Se observa que, alcanzado el Escenario 4, entre un 70% y un 75% del contaminante total que transporta la escorrentía acaba siendo tratada por las técnicas LID. Esto demuestra que, incluso para eventos de lluvia importantes las técnicas de drenaje urbano sostenible son capaces de tratar la escorrentía y reducir la carga contaminante enviada a la red de alcantarillado.

De los 4 escenarios de actuación, son los Escenarios 1 y 3 los que una mayor cantidad de contaminante son capaces de reducir con respecto su escenario anterior. Por lo tanto, en términos de calidad, los pavimentos permeables y tejados verdes no destacan en la manera que lo hacían con la cantidad. Se concluye por lo tanto que grandes superficies de zanjas de infiltración o celdas de bio-retención demuestran una gran efectividad en el tratamiento de la escorrentía.

### 6.6.2.3. Carga contaminante en los colectores

El análisis de la cantidad de contaminante que circula por los colectores es, en cierto modo, equivalente a estudiar los polutogramas de salida. Sin embargo, la comparación del nivel de contaminación entre los diferentes colectores permite sectorizar los problemas y actuar de un modo más eficiente. A continuación se presentan tres gráficas, una para cada tipo de contaminante, mostrando la masa total de contaminante que transcurre a través de cada colector; se comparan los Escenarios 0 y 4:

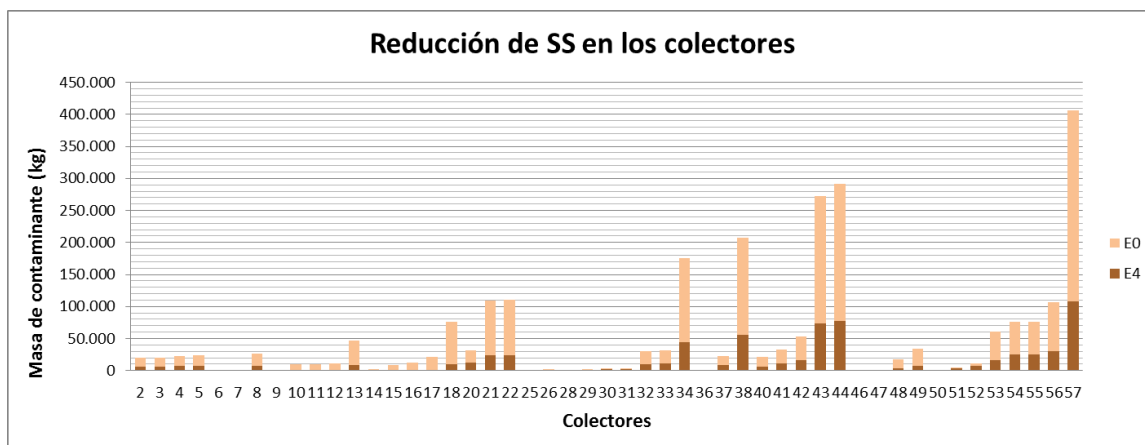


Figura 92: Representación gráfica de la reducción de SS en los diferentes colectores entre los Escenarios 0 y 4.

El patrón que se observa es, para los tres tipos de contaminante, muy similar. Existe una diferencia muy marcada de carga contaminante de un colector a otro. Destacan, por ejemplo los conductos 34, 38, 43, 44 y 57 como los colectores que más cantidad de contaminante transportan. Estos 5 colectores componen la mitad final del eje de colectores bajo el Carrer Torras i Bages. Cabe recordar que esta es una de las dos ramas principales de la red de drenaje existente y recolecta la escorrentía generada en 33 de las 42 sub-cuencas. De modo que parece razonable que sean estos colectores los que, al final de la simulación, hayan transportado una mayor cantidad de contaminantes.

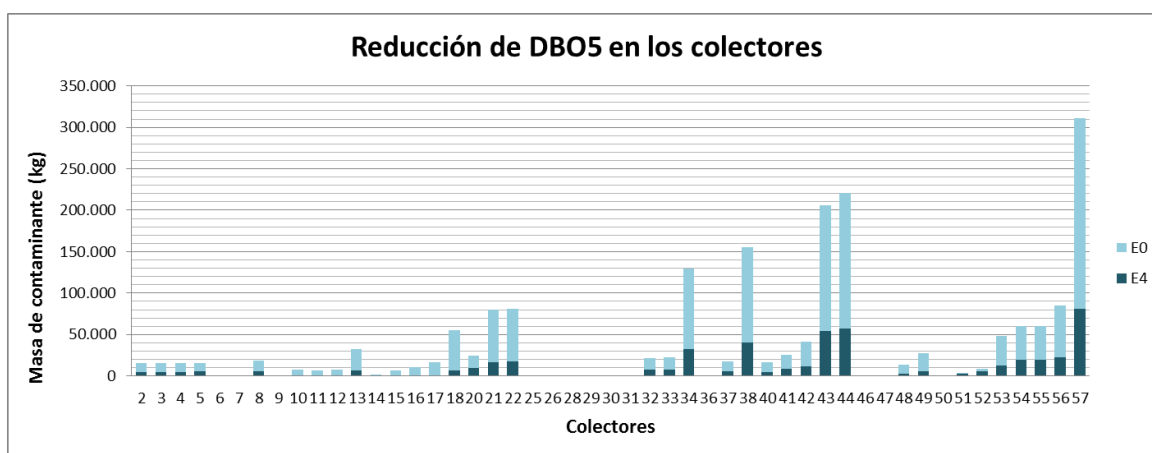


Figura 93: Representación gráfica de la reducción de DBO5 en los diferentes colectores entre los Escenarios 0 y 4.

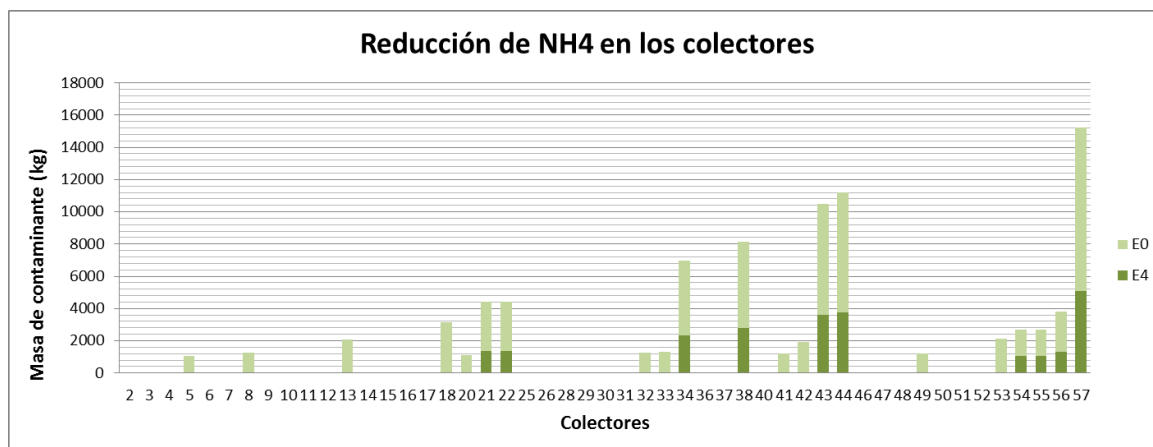


Figura 94: Representación gráfica de la reducción de NH4 en los diferentes colectores entre los Escenarios 0 y 4.

Los colectores correspondientes a la otra rama principal de la red (conductos 53, 54, 55 y 56) se corresponden, como parece lógico al segundo grupo de colectores con más carga contaminante. Se trata de la rama de colectores bajo el Carrer de Ponent.

Por otro lado, al igual que se ha detectado en los apartados anteriores, la reducción general de contaminantes desde el Escenario 0 hasta el 4 es extraordinaria. La reducción es, de manera proporcional, muy similar en todos los colectores; se puede deducir así que la limpieza de la escorrentía en superficie es generalmente uniforme en toda la superficie de la cuenca de estudio.



## 7. Comparativa económica

Dado por finalizado el estudio de la capacidad de las técnicas de drenaje urbano sostenible para rehabilitar sistemas de drenaje urbanos, se pasará ahora a la segunda parte del análisis de la cuenca de estudio: La comparación, en términos económicos, de cada uno de los escenarios plantados en el capítulo anterior con una rehabilitación de tipo convencional de la red de colectores existente.

Hasta el momento, este estudio se ha centrado en averiguar si, con una aplicación masiva de técnicas de drenaje sostenible, es posible eliminar los problemas de cantidad y calidad de la escorrentía urbana. Una vez conocemos los efectos del uso de elementos LID a diferentes niveles y los beneficios que estos pueden aportar a la ciudad y sus habitantes, se pretende descubrir qué efectos tendrá a nivel económico una apuesta de este calibre por las alternativas LID.

En ocasiones, la aplicación de algunas de las técnicas LID puede suponer un coste demasiado elevado que los ayuntamientos no se pueden permitir. Menos aun si se aplican en el número y las dimensiones que se ha propuesto en este trabajo. Por otro lado, una rehabilitación de la red de colectores más tradicional solamente solucionará los problemas de capacidad de la red, mientras que las deficiencias de la misma relacionadas con la calidad de la escorrentía, biodiversidad y calidad de vida permanecerán ignoradas. Dada esta dicotomía que se presenta en el ámbito del drenaje urbano, este trabajo pretende facilitar la toma de decisiones al respecto, elaborando una comparativa económica entre las dos alternativas.

En el presente capítulo se calculará, de nuevo mediante el software de cálculo SWMM5, una rehabilitación de la red de colectores de la cuenca de estudio por medio de la retirada y sustitución de algunos de estos. Se definirán, a continuación, una serie de partidas, precios y mediciones que permitirán la elaboración de unos presupuestos aproximados para cada uno de los escenarios de actuación y para la rehabilitación convencional. De esta manera se podrá estimar el coste de cada una de las alternativas. Así, se dispondrá de una herramienta adicional para discernir en qué caso conviene más un tipo de rehabilitación u otra.

Resultará interesante descubrir a qué precio se pagan los beneficios de un drenaje más sostenible y discutir si el resultado justifica el cambio de paradigma en el drenaje urbano que tanto está siendo debatido y puesto en duda.

### 7.1. Rehabilitación convencional

Para el cálculo de una rehabilitación convencional de la red de drenaje existente se deberá partir de la situación actual, es decir, el Escenario 0. En esta ocasión, ningún elemento LID va a ser ubicado; simplemente se detectará el mínimo número posible de colectores a sustituir para que la red no sufra problemas por inundación en superficie.

En primer lugar, se va a analizar en qué puntos se producen las salidas de agua a superficie, origen de la inundación y, por lo tanto, cuáles son los tramos de la red más problemáticos. Los nodos en los que sale agua a superficie en algún momento de la simulación son los siguientes:

Nodo	Tiempo inundado	Caudal máximo de salida	Instante del pico de inundación	Volumen total inundado
	(h)	(litros/seg)	(h de simulación)	(x10 <sup>6</sup> litros)
8	0,01	19,48	1:09	0
12	0,01	9,14	1:09	0
13	0,01	12,52	1:08	0
16	0,01	115,44	1:10	0
39	0,26	188,71	1:10	0,096
40	0,33	226,57	1:10	0,157
41	0,14	57,48	1:10	0,014
42	0,06	21,37	1:10	0,003
43	0,13	20,17	1:10	0,006
44	0,11	83	1:10	0,016
40up	0,15	40,96	1:10	0,01
42up	0,01	33,75	1:03	0
43up	0,01	2,11	1:03	0

Tabla 11: Nodos que sufren inundación en Escenario 0.

Una vez se conocen los nodos inundados se visualizará cada uno de los perfiles en los que intervienen dichos nodos para analizar cuál es la situación de partida. De todos modos, se conoce por los resultados presentados en la sección 6.6.1. *Resultados* y por los valores de la tabla anterior que son los nodos 39 y 40 los que expulsan la mayor parte del caudal de inundación.

Se detecta que los tramos de colectores en los que existe inundación y que, por lo tanto, serán el objeto de la rehabilitación de la red de drenaje existente, son los que se encuentran bajo el Carrer de Ponent, Carrer Almogàvers i el Carrer Prim.

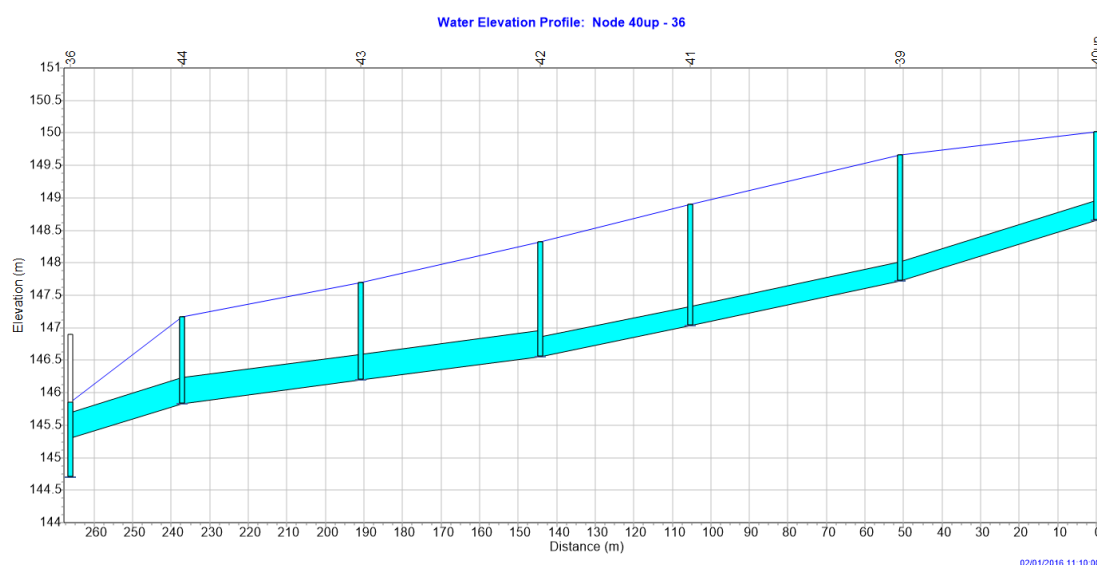
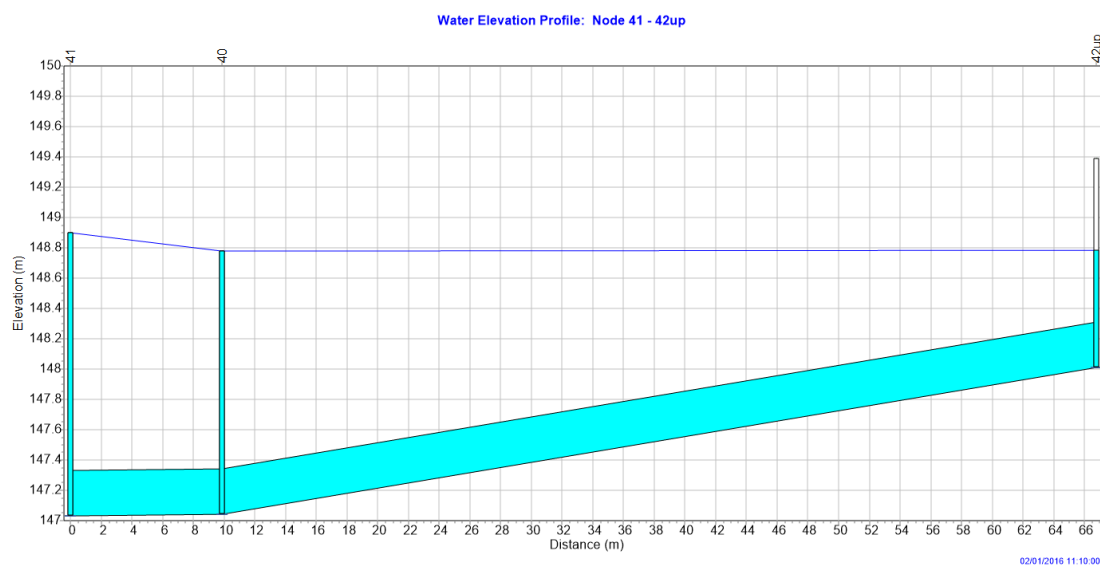
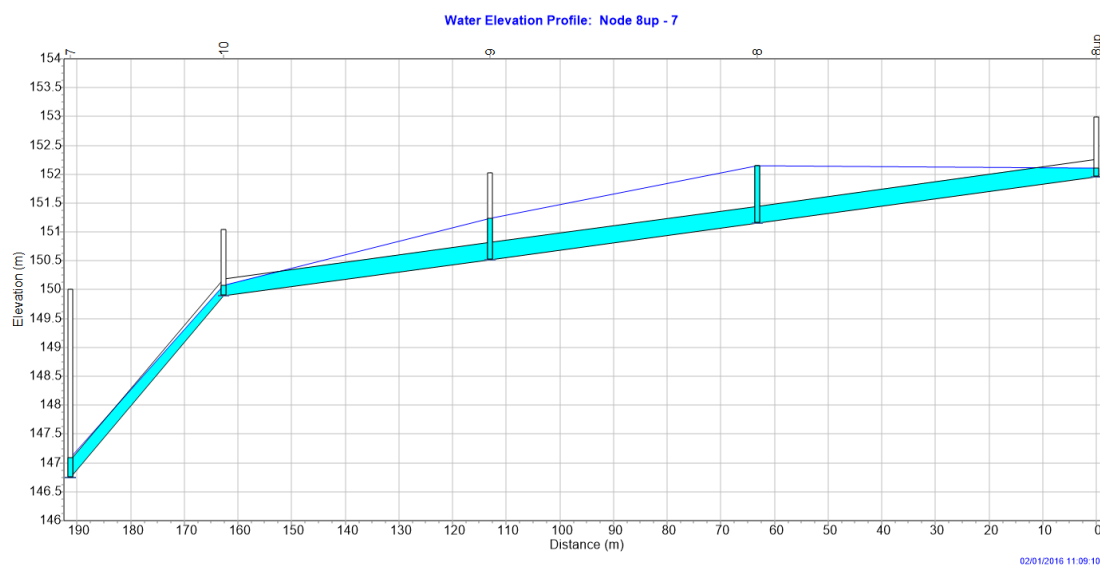


Figura 95: Vista de perfil del comportamiento de los colectores bajo el Carrer de Ponent en el instante más desfavorable de la simulación para los nodos 39, 40up, 41, 42, 43 y 44 (1h 10 min, como indica la Tabla 10).



**Figura 96:** Vista de perfil del comportamiento de los colectores bajo el Carrer Almogàvers en el instante más desfavorable de la simulación para los nodos 40 y 41 (1h 10 min, como indica la Tabla 10).



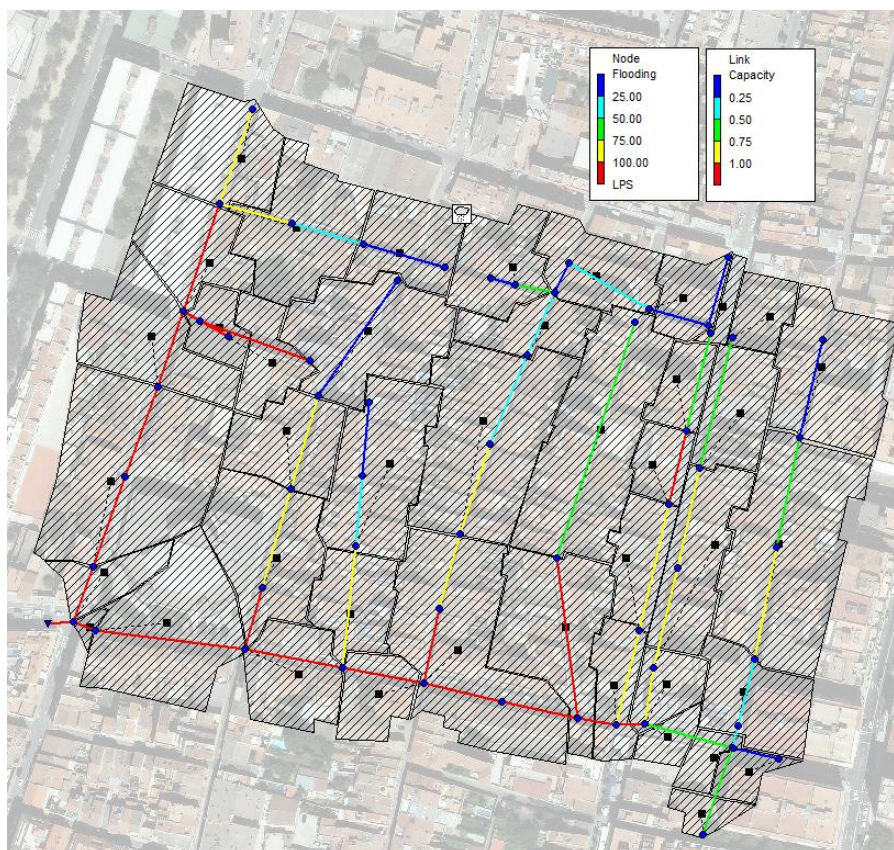
**Figura 97:** Vista de perfil del comportamiento de los colectores bajo el Carrer Prim en el instante más desfavorable de la simulación para el nodo 8 (1h 09 min, como indica la Tabla 10).

Los pozos de registro detectados como problemáticos son menos que los nodos que aparecen en la Tabla 10. Los nodos de la red que no se han detectado como problemáticos de manera gráfica se han catalogado de no problemáticos. Estas incongruencias en los resultados serán posiblemente fruto de inestabilidades computacionales, ya que su tiempo y volumen total de

inundación son muy bajos. Se va a centrar la atención en aquellos puntos de la red dónde la actuación es realmente necesaria e inminente.

Después de un proceso de tanteo y cálculo con diferentes diámetros de colector en los diferentes tramos detectados como problemáticos, se ha llegado a la conclusión que con la sustitución de los colectores del Carrer de Ponent y uno de los colectores del Carrer Prim ya se obtiene un escenario rehabilitado. Se ha tomado el criterio de que un volumen total de inundación en el sistema menor a 1000 litros equivale a solucionar el problema de inundaciones en la cuenca de estudio; principalmente para tener en cuenta las inestabilidades computacionales mencionadas anteriormente.

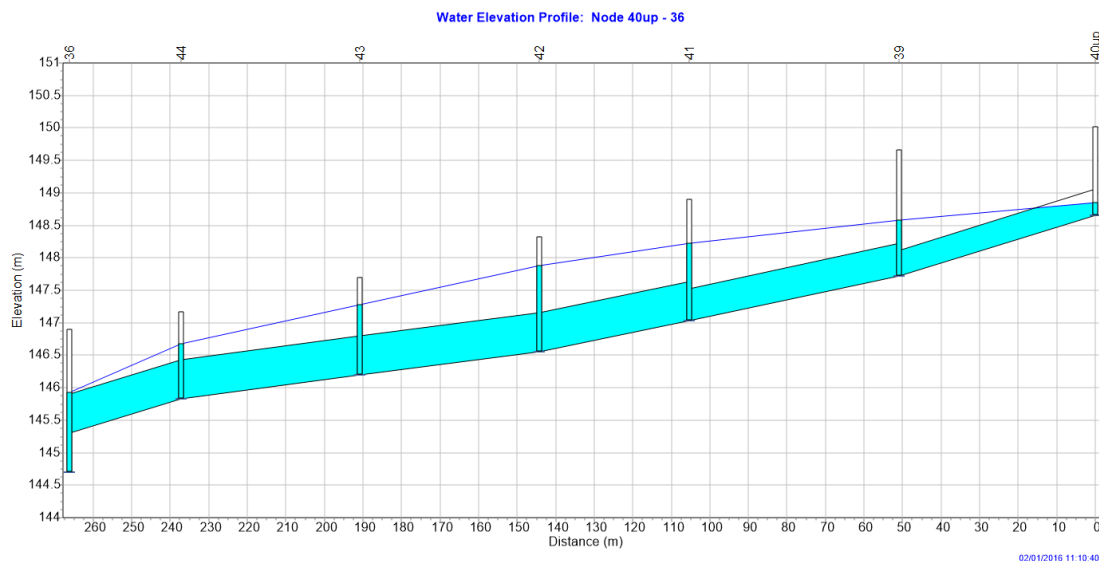
En la figura a continuación se muestra una instantánea de la fracción de capacidad a la que se encuentran los colectores y de los litros/seg que liberan los pozos de registro en el instante más desfavorable de la simulación (1h y 10 min después del inicio de la tormenta):



**Figura 98:** Representación por colores de la carga en los colectores y la inundación en los nodos, en el mapa de la cuenca de estudio (1 hora y 10 minutos después del inicio del evento de lluvia) para el escenario rehabilitado de manera convencional.

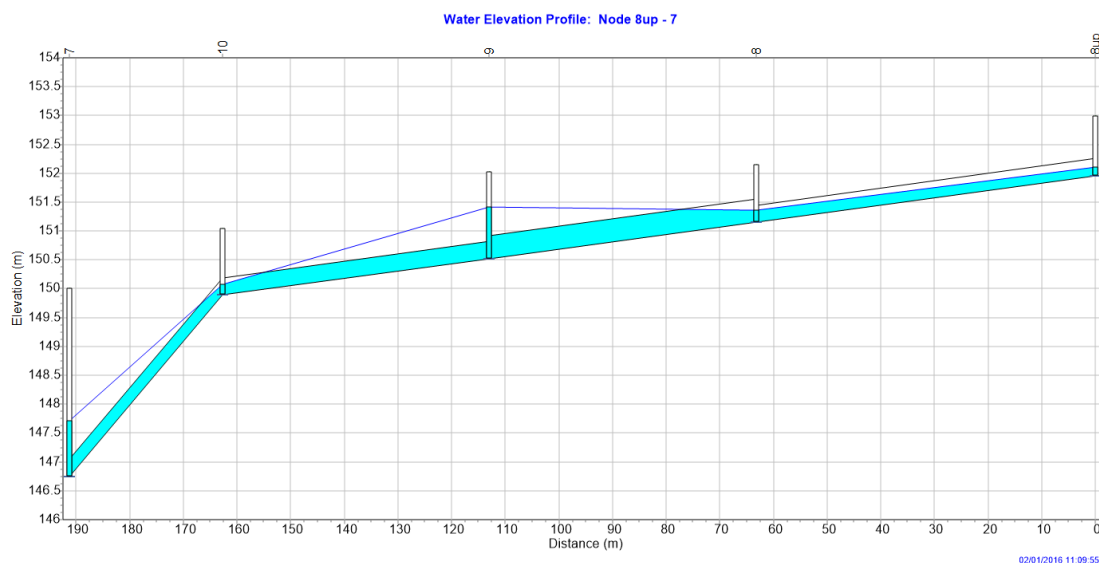
Se observa como el problema de inundación ha desaparecido pero los dos ejes principales de colectores continúan soportando grandes cargas de caudal. Los valores indicativos de la fracción de capacidad a la que se encuentran los colectores prácticamente no difieren a los del Escenario 0; el número total de colectores que entra en carga coincide. El volumen de inundación total del sistema es ahora de 1000 litros. Este tipo de rehabilitación no pretende reducir ni tratar caudales

de escorrentía sino simplemente permitir que los colectores realicen su función mediante un dimensionamiento adecuado, eliminando los volúmenes de agua en la calle.



**Figura 99:** Vista de perfil del comportamiento de los colectores bajo el Carrer de Ponent en el instante más desfavorable de la simulación (1h 10 min).

En la representación del nuevo perfil bajo el Carrer de Ponent se observan los cambios de diámetro en los colectores. Entre los nodos 36 y 42 se ha pasado de 0,4 m a 0,6 m, entre los nodos 42 y 41 se ha pasado de 0,3 m a 0,6 m, entre los nodos 41 y 39 se ha pasado de 0,3 m a 0,5 m y entre los nodos 39 y 40up se ha pasado de 0,3 m a 0,4 m.



**Figura 100:** Vista de perfil del comportamiento de los colectores bajo el Carrer de Prim en el instante más desfavorable de la simulación (1h 09 min).

En cuanto al Carrer Prim se comprueba que, simplemente aumentando de diámetro del colector entre los nodos 8 y 9 de 0,3m a 0,4m, ya se consigue que el pozo de registro 8 no desborde.

Se acepta como criterio de rehabilitación la no salida de agua al exterior desde la red. Otro criterio más estricto pudiera haber sido rehabilitar la red de manera que el 100% de la misma funcionara en lámina libre (criterio habitual de diseño en obra nueva) pero como nos encontramos con una red ya muy consolidada, se ha preferido relajar este criterio y concentrarse en la eliminación de la salida de agua al exterior.

Por lo tanto, podemos concluir que se estaba totalmente en lo cierto cuando, a lo largo del capítulo 6, se predecía que el problema de las inundaciones en la cuenca de estudio estaba totalmente localizado en la vertiente oeste de la cuenca de estudio. Por medio de un cambio de colectores en el Carrer de Ponent y un pequeño ajuste en el Carrer Prim ya somos capaces de reducir la cantidad de volumen de inundación total más que con la implantación de LIDs del Escenario 4. De modo que, si el único objetivo es despreocuparse de los daños y malestar provocados, año tras año por las inundaciones, una rehabilitación tradicional es una opción simple y efectiva. Si las inquietudes detrás de la modificación del sistema de drenaje pasan, además, por una gestión más eficaz del agua, por reducir el vertido de contaminantes en los cuerpos receptores cercanos y por apostar por un modo de ciudad más sostenible, quizás la decisión no es tan sencilla.

## 7.2. Precios y mediciones para la valoración económica

Después de calcular y definir la rehabilitación de la red de alcantarillado, mediante la retirada de colectores obsoletos y la instalación de otros nuevos de mayor diámetro, se deberán definir las partidas y precios para cada escenario de rehabilitación.

En el caso de los 4 escenarios de actuación mediante técnicas LID se va a definir una partida para cada tipo de elemento LID utilizado. Y para la actuación de tipo convencional se van a utilizar partidas de obra habituales en proyectos de construcción. Las partidas y precios se han definido con la ayuda del banco de precios del software TCQ2000 de ITeC de gestión técnica, económica y temporal de las obras de construcción y de la web [www.generadordeprecios.info](http://www.generadordeprecios.info) propiedad de CYPE Ingenieros S.A.

Cabe recordar que la función de esta comparativa económica es meramente orientativa y que tanto los precios como mediciones son aproximados. El objetivo es el de proporcionar órdenes de magnitud de los costes de una y otra alternativa y, de esta manera, proporcionar una herramienta para que cada interesado juzgue si los beneficios aportados por cada opción se corresponden con su coste. Los resultados serán representativos y de cierta utilidad si las diferencias obtenidas entre las alternativas que implican técnicas LID y las que no son considerables.

La justificación de los precios de cada una de las partidas se puede encontrar en el ANEXO 5.



### 7.3. Presupuestos para cada uno de los escenarios de rehabilitación

A continuación se presentarán los presupuestos finales obtenidos que resumen los costes de los Escenarios de 0 a 4 de actuación con técnicas de drenaje urbano sostenible y de la rehabilitación con red convencional de colectores:

#### 7.3.1. Presupuesto para el Escenario 1 de actuación con técnicas LID

UM	Partida	Medición	Precio	Importe
<b>Señalización de la obra</b>				
ml	Colocación de valla de seguridad formada por malla electrosoldada con pliegues de refuerzo. Colocación de balias luminosas intermitentes y señales provisionales de obra de chapa de acero galvanizado. Pintado de marcas viales longitudinales, flechas e inscripciones. Criterio de medición: metro lineal de señalización.	1204,212	15,882 €	19.124,934 €
<b>Celda de bio-retención</b>				
m2	Excavación para rebajar el terreno por medios mecánicos. Construcción de una celda de bioretención ajardinada protegida por una bema de piezas de hormigón. Formada por una capa de grava drenante de 0,3m, una capa separadora de geotextil, una capa de arena de 0,45m. Criterio de medición: m2 de superficie.	5757,140	61,352 €	353.213,455 €
<b>Partidas alzadas</b>				
PA	Limpieza de las obras y transporte de tierras y residuos			44.800,000 €
<b>PRECIO TOTAL</b>				<b>417.138,389 €</b>

### 7.3.2. Presupuesto para el Escenario 2 de actuación con técnicas LID

UM	Partida	Medición	Precio	Importe
<b>Señalización de la obra</b>				
ml	Colocación de valla de seguridad formada por malla electrosoldada con pliegues de refuerzo. Colocación de balias luminosas intermitentes y señales provisionales de obra de chapa de acero galvanizado. Pintado de marcas viales longitudinales, flechas e inscripciones. Criterio de medición: metro lineal de señalización.	1204,212	15,882 €	19.124,934 €
<b>Pozo de infiltración</b>				
m2	Realización del vaciado de las áreas y de las tareas de excavación por medios mecánicos. Construcción pozo de infiltración por medio de una capa de grava drenante de 0,45m de espesor y geotéxtil de polipropileno no tejido de 100 a 110 g/m2 cubriendo toda la superficie de contacto de la grava con el terreno circundante. Ejecución de sumidero por medio de tubo de PVC. Conexión de la bajante del domicilio con el pozo. Colocación de arqueta prefabricada para labores de registro y derivación del sumidero. Criterio de medición: m2 de superficie.	2579,770	21,522 €	55.520,539 €
<b>Rain Barrel</b>				
u	Suministro e instalación de un Rain Barrel domiciliario de 280 litros de capacidad, de polietileno de alta densidad. Incluye válvula de regulación de flujo de salida. No apto para usos que requieran agua potable. Criterio de medición: por unidad instalada.	137,000	163,735 €	22.431,695 €
<b>Celda de bio-retención</b>				
m2	Excavación para rebajar el terreno por medios mecánicos. Construcción de una celda de bioretención ajardinada protegida por una bema de piezas de hormigón. Formada por una capa de grava drenante de 0,3m, una capa separadora de geotextil, una capa de arena de 0,45m. Criterio de medición: m2 de superficie.	5757,140	61,352 €	353.213,455 €
<b>Jardín de lluvia</b>				
m2	Excavación para rebajar el terreno por medios mecánicos. Construcción de un jardín de lluvia protegido por una bema perimetral de hormigón en masa. Formada por una una capa de arena de 0,45m. Criterio de medición: m2 de superficie.	2579,770	26,976 €	69.592,707 €
<b>Partidas alzadas</b>				
PA	Limpieza de las obras y transporte de tierras y residuos			44.800,000 €
<b>PRECIO TOTAL</b>				<b>564.683,331 €</b>

### 7.3.3. Presupuesto para el Escenario 3 de actuación con técnicas LID

UM	Partida	Medición	Precio	Importe
<b>Señalización de la obra</b>				
ml	Colocación de valla de seguridad formada por malla electrosoldada con pliegues de refuerzo. Colocación de balias luminosas intermitentes y señales provisionales de obra de chapa de acero galvanizado. Pintado de marcas viales longitudinales, flechas e inscripciones. Criterio de medición: metro lineal de señalización.	4767,956	15,882 €	75.723,247 €
<b>Pozo de infiltración</b>				
m2	Realización del vaciado de las áreas y de las tareas de excavación por medios mecánicos. Construcción pozo de infiltración por medio de una capa de grava drenante de 0,45m de espesor y geotéxtil de polipropileno no tejido de 100 a 110 g/m2 cubriendo toda la superficie de contacto de la grava con el terreno circundante. Ejecución de sumidero por medio de tubo de PVC. Conexión de la bajante del domicilio con el pozo. Colocación de arqueta prefabricada para labores de registro y derivación del sumidero. Criterio de medición: m2 de superficie.	24027,010	21,522 €	517.097,476 €
<b>Rain Barrel</b>				
u	Suministro e instalación de un Rain Barrel domiciliario de 280 litros de capacidad, de polietileno de alta densidad. Incluye válvula de regulación de flujo de salida. No apto para usos que requieran agua potable. Criterio de medición: por unidad instalada.	275,000	163,735 €	45.027,125 €
<b>Celda de bio-retención</b>				
m2	Excavación para rebajar el terreno por medios mecánicos. Construcción de una celda de bioretención ajardinada protegida por una bema de piezas de hormigón. Formada por una capa de grava drenante de 0,3m, una capa separadora de geotextil, una capa de arena de 0,45m. Criterio de medición: m2 de superficie.	5757,140	61,352 €	353.213,455 €
<b>Jardín de lluvia</b>				
m2	Excavación para rebajar el terreno por medios mecánicos. Construcción de un jardín de lluvia protegido por una bema perimetral de hormigón en masa. Formada por una capa de arena de 0,45m. Criterio de medición: m2 de superficie.	3869,660	26,976 €	104.389,196 €
<b>Demolición y repavimentación</b>				
m2	Firme flexible para frecuencia baja de tráfico pesado, formado por pavimento de tratamiento superficial monocapa con base todo uno artificial.	12264,990	14,117 €	173.141,887 €
<b>Demolición y repavimentación acera</b>				
m2	Demolición de los elementos constructivos que sea necesario eliminar y del pavimento en las aceras existentes. Construcción de un pavimento de bloques de hormigón de 0,125m de espesor, una sub-base de arena de 0,1m de espesor. Criterio de medición: m2 de superficie.	3869,660	30,607 €	118.439,574 €
<b>Partidas alzadas</b>				
PA	Limpieza de las obras y transporte de tierras y residuos			80.500,000 €
<b>PRECIO TOTAL</b>				<b>1.467.531,960 €</b>

### 7.3.4. Presupuesto para el Escenario 4 de actuación con técnicas LID

UM	Partida	Medición	Precio	Importe
<b>Señalización de la obra</b>				
m1	Colocación de valla de seguridad formada por malla electrosoldada con pliegues de refuerzo. Colocación de balias luminosas intermitentes y señales provisionales de obra de chapa de acero galvanizado. Pintado de marcas viales longitudinales, flechas e inscripciones. Criterio de medición: metro lineal de señalización.	4767,956	15,882 €	75.723,247 €
<b>Tejado verde</b>				
m2	Cubierta plana ajardinada extensiva convencional, formación de pendientes con hormigón celular, capa separadora con geotextil, impermeabilización y protección antirraíz, con lámina PVC flexible resistente a la intemperie, capa de retención y drenante con lámina nodular de polietileno de alta densidad y capa de arena de 0,15m de grosor. Criterio de medición: m2 de superficie. Con deducción de superficie correspondiente a aberturas, de acuerdo con los siguientes criterios:- Aberturas <= 1 m2: No se deducen- Aberturas > 1 m2: Se deduce el 100%.	4621,590	57,897 €	267.577,536 €
<b>Pavimento permeable en calzada</b>				
m2	Demolición de los elementos constructivos que sea necesario eliminar y de la mezcla bituminosa existente. Realización de las tareas de excavación para firmes por medios mecánicos. Construcción de un pavimento permeable de mezcla bituminosa drenante de 0,125m de espesor, una sub-base de arena de 0,1m de espesor, capa separadora con geotextil y una base de grava drenante de 0,3m de espesor. Criterio de medición: m2 de superficie.	12264,991	21,619 €	265.160,532 €
<b>Pavimento permeable en aceras</b>				
m2	Demolición de los elementos constructivos que sea necesario eliminar y del pavimento en las aceras existentes. Realización de las tareas de excavación para firmes por medios mecánicos. Construcción de un pavimento permeable de bloques de hormigón de 0,125m de espesor, una sub-base de arena de 0,1m de espesor capa separadora con geotextil y una base de grava drenante de 0,3m de espesor. Criterio de medición: m2 de superficie.	7892,360	39,038 €	308.105,391 €
<b>Pozo de infiltración</b>				
m2	Realización del vaciado de las áreas y de las tareas de excavación por medios mecánicos. Construcción pozo de infiltración por medio de una capa de grava drenante de 0,45m de espesor y geotextil de polipropileno no tejido de 100 a 110 g/m2 cubriendo toda la superficie de contacto de la grava con el terreno circundante. Ejecución de sumidero por medio de tubo de PVC. Conexión de la bajante del domicilio con el pozo. Colocación de arqueta prefabricada para labores de registro y derivación del sumidero. Criterio de medición: m2 de superficie.	5159,540	21,522 €	111.041,079 €
<b>Rain Barrel</b>				
u	Suministro e instalación de un Rain Barrel domiciliario de 280 litros de capacidad, de polietileno de alta densidad. Incluye válvula de regulación de flujo de salida. No apto para usos que requieran agua potable. Criterio de medición: por unidad instalada.	412,000	163,735 €	67.458,820 €
<b>Celda de bio-retención</b>				
m2	Excavación para rebajar el terreno por medios mecánicos. Construcción de una celda de bioretención ajardinada protegida por una bema de piezas de hormigón. Formada por una capa de grava drenante de 0,3m, una capa separadora de geotextil, una capa de arena de 0,45m. Criterio de medición: m2 de superficie.	5757,140	61,352 €	353.213,455 €
<b>Jardín de lluvia</b>				
m2	Excavación para rebajar el terreno por medios mecánicos. Construcción de un jardín de lluvia protegido por una bema perimetral de hormigón en masa. Formada por una capa de arena de 0,45m. Criterio de medición: m2 de superficie.	5159,540	26,976 €	139.185,415 €
<b>Partidas alzadas</b>				
PA	Limpieza de las obras y transporte de tierras y residuos			82.200,000 €
<b>PRECIO TOTAL</b>				<b>1.669.665,475 €</b>

### 7.3.5. Presupuesto para el escenario de rehabilitación convencional

UM	Partida	Medición	Precio	Importe
<b>Señalización de la obra</b>				
ml	Colocación de valla de seguridad formada por malla electrosoldada con pliegues de refuerzo. Colocación de balias luminosas intermitentes y señales provisionales de obra de chapa de acero galvanizado. Pintado de marcas viales longitudinales, flechas e inscripciones. Criterio de medición: metro lineal de señalización.	662,000	15,882 €	10.513,685 €
<b>Demolición del pavimento existente</b>				
m2	Demolición de pavimento de mezcla bituminosa, de hasta 15 cm de grosor y más de 2 m de ancho con retroexcavadora y martillo neumático y carga sobre camión. Criterio de medición: m2 de pavimento realmente demolido.	2602,880	3,700 €	9.630,370 €
<b>Excavación de zanja y pozos de registro</b>				
m3	Excavación de zanja y pozo de hasta 4m de profundidad, en terreno compacto (SPT 20-50), realizada con retroexcavadora y dejando las tierras excavadas en el lateral. Criterio de medición: m3 de volumen excavado, medido como la diferencia entre los perfiles transversales del terreno levantados antes de comenzar las obras i los perfiles teóricos de los planos. No se tiene que abonar el exceso de excavación que se haya producido sin autorización, ni la carga, ni el transporte del material ni los trabajos necesarios para rellenarlo. Incluye la carga, alisado de taludes, agotamientos por lluvia o inundación y cuantas operaciones sean necesarias para una correcta ejecución de las obras. Solo se tienen que abonar los deslizamientos no provocados, siempre que se hayan cumplido todas las prescripciones relativas a excavación, entibación y voladura.	4934,611	5,700 €	28.127,282 €
<b>Entibación y apuntalamiento de la zanja</b>				
m2	Entibación y apuntalamiento a cielo abierto, de hasta 3m de altura, con madera, y para una protección del 25%. Criterio de medición: m2 de superficie medida.	632,210	14,734 €	9.314,811 €
<b>Desconexión de acometida de la instalación de saneamiento del edificio.</b>				
u	Desconexión de la acometida de la instalación de saneamiento del edificio, identificando su ubicación mediante consulta al Ayuntamiento e investigación in situ, detallando los puntos de acometida y trazado de los colectores, con realización de las catas necesarias y pruebas con aguas coloreadas, sin afectar a la estabilidad de los elementos constructivos a los que pueda estar unida. Incluso p/p de taponado del alcantarillado, limpieza, acopio, retirada y carga manual de escombros sobre camión o contenedor.	47,000	162,941 €	7.658,213 €
<b>Demolición de colectores y pozos de registro</b>				
ml	Demolición de alcantarillado de hasta 60 cm de diámetro o hasta 40x60 cm, de hormigón vibropresado, con medios mecánicos y carga sobre camión. Demolición de pozo de diámetro 80 cm, de apredes de 15 cm de ladrillo, con medios mecánicos y carga sobre camión. Criterio de medición: m de longitud realmente demolida.	331,000	11,163 €	3.694,979 €
<b>Relleno con arena al 90% del PM</b>				
m3	Relleno de zanjas con arena 0/5 mm con medios mecánicos, y compactación al 90% del Proctor Modificado con medios mecánicos.	260,288	20,275 €	5.277,326 €
<b>Relleno con material granular no plástico compactado al 95% de PM</b>				
m3	Relleno de zanjas con grava 20/30 mm con medios mecánicos, y compactación al 95% del Proctor Modificado con medios mecánicos.	2060,692	19,345 €	39.863,976 €
<b>Relleno con materiales de la excavación al 90% del PM</b>				
m3	Relleno de zanjas con tierra de la propia excavación con medios mecánicos, y compactación al 90% del Proctor Modificado con medios mecánicos.	2650,521	4,707 €	12.476,083 €
<b>Suministro e instalación de tuberías de hormigón de 400 mm de diámetro</b>				
ml	Alcantarillado de tubo de hormigón de D=40 cm, rejuntado interiormente con mortero M-10, solera de 15 cm. Criterio de medición: m de longitud instalada, entre los ejes de los elementos o de los puntos para conectar. Este criterio incluye pérdidas de material por recortes y empalmes que hayan sido efectuados. Este criterio incluye pérdidas asociadas a la realización de pruebas sobre la tubería instalada.	101,000	49,598 €	5.009,375 €

<b>Suministro e instalación de tuberías de hormigón de 500 mm de diámetro</b>				
ml	Alcantarillado de tubo de hormigón de D=50 cm, rejuntado interiormente con mortero M-10, solera de 15 cm. Criterio de medición: m de longitud instalada, entre los ejes de los elementos o de los puntos para conectar. Este criterio incluye pérdidas de material por recortes y empalmes que hayan sido efectuados. Este criterio incluye pérdidas asociadas a la realización de pruebas sobre la tubería instalada.	55,000	61,070 €	3.358,847 €
<b>Suministro e instalación de tuberías de hormigón de 600 mm de diámetro</b>				
ml	Alcantarillado de tubo de hormigón de D=60 cm, rejuntado interiormente con mortero M-10, solera de 15 cm. Criterio de medición: m de longitud instalada, entre los ejes de los elementos o de los puntos para conectar. Este criterio incluye pérdidas de material por recortes y empalmes que hayan sido efectuados. Este criterio incluye pérdidas asociadas a la realización de pruebas sobre la tubería instalada.	163,000	74,034 €	12.067,510 €
<b>Suministro e instalación de pozos de registro</b>				
u	Pozo de registro, de 1,00 m de diámetro interior y de 2,1 m de altura útil interior, de elementos prefabricados de hormigón en masa, sobre solera de 25 cm de espesor de hormigón armado HA-30/B/20/IIb+Qb ligeramente armada con malla electrosoldada, con cierre de tapa circular y marco de fundición clase B-125 según UNE-EN 124.	8,000	599,821 €	4.798,566 €
<b>Repavimentación de las áreas afectadas</b>				
m2	Firme flexible para frecuencia baja de tráfico pesado, formado por pavimento de tratamiento superficial monocapa con base todo uno artificial.	2602,880	10,417 €	27.113,569 €
<b>Conexión de la acometida del edificio a la red general de saneamiento del municipio.</b>				
u	Suministro y montaje de la conexión de la acometida del edificio a la red general de saneamiento del municipio a través de pozo de registro (sin incluir). Incluso comprobación del buen estado de la acometida existente, trabajos de conexión, rotura del pozo de registro desde el exterior con martillo compresor hasta su completa perforación, acoplamiento y recibido del tubo de acometida, empalme con junta flexible, repaso y bruñido con mortero de cemento, industrial, M-5 en el interior del pozo, sellado, pruebas de estanqueidad, reposición de elementos en caso de roturas o de aquellos que se encuentren deteriorados en el tramo de acometida existente. Totalmente montada, conexionada y probada. Sin incluir excavación.	47,000	199,425 €	9.372,952 €
<b>Partidas alzadas</b>				
PA	Limpieza de las obras y transporte de tierras y residuos			10.900,000 €
PA	Agotamiento del nivel freático con bomba autoaspirante, para un caudal máximo de 18 m³/h. Incluye transporte y retirada de la bomba.			2.500,000 €
<b>PRECIO TOTAL</b>				<b>201.677,546 €</b>

## 7.4. Comparación y discusión de resultados

Al poder comparar los precios totales de cada una de las propuestas de rehabilitación del sistema de drenaje de la cuenca del caso de estudio se comprueba que la utilización de las técnicas sostenibles dispara de manera desproporcionada el coste de la actuación.

El coste del Escenario 4 de aplicación de técnicas LID supera en más de 8 veces el coste de una rehabilitación convencional. Es cierto que el Escenario 4 representa un estadio muy avanzado de la utilización de técnicas de drenaje urbano sostenible y que no tendría sentido la aplicación de tal cantidad de superficie LID de manera simultánea. Pero incluso el Escenario 1, que sufre inundaciones de 152.000 litros para tormentas de 10 años de periodo de retorno, ya supone un coste que duplica al de una rehabilitación tradicional. Además, se tardarían años en aplicar una superficie suficiente de LIDs que tuviera un efecto notable a un ritmo que hiciera asumible su coste. Se puede concluir que una rehabilitación de tipo convencional será la opción más interesante si no se puede o desea realizar elevadas inversiones en alternativas LID, o si no



existen problemas de tipo ambiental que requieran de una mejora de la calidad de la escorrentía y las inquietudes en relación a la biodiversidad, calidad de vida y sostenibilidad en general no son muy destacables.

Sin embargo, es importante resaltar que la rehabilitación convencional es, para este caso de estudio, ciertamente particular. Las deficiencias de la red de colectores son muy marcadas en puntos muy concretos de esta, mientras que el resto de ramas funcionan prácticamente con total normalidad. Este hecho permite que el número de colectores que necesitan ser sustituidos sea muy reducido y que las obras de rehabilitación se limiten a prácticamente una única calle. Por lo tanto, el volumen de excavación y de materiales de relleno y el número de tuberías de hormigón y pozos de registro (las partidas más costosas del presupuesto) es muy reducido para estar rehabilitándose una cuenca de un tamaño tan considerable. En definitiva, cabe remarcar que la cuenca de estudio tiene un comportamiento particular y que, por ello, los costes de la rehabilitación convencional aquí presentados pueden no ser representativos para otras cuencas urbanas de tamaño similar.

Por otro lado, llama la atención la gran diferencia entre los presupuestos de los Escenarios 2 y 3; el coste aumenta en alrededor de 900.000 €. Aunque cabe recordar que los cambios más importantes en cuanto a mejoras del sistema de drenaje se obtienen con la incorporación de la zanja de infiltración bajo los pavimentos. Entre los Escenario 1 y 2, en cambio, se incrementa el coste en apenas 150.000 €, luego la aplicación de jardines de lluvia, zanjas de infiltración y rain barrels en las viviendas particulares son las opciones LID más económicas. Pero se remite, por ejemplo, a los resultados presentados en los capítulos 6.6.1.1. *Hidrograma de salida*, 6.6.1.6. *Inundación* o 6.6.2. *Resultados en relación a la calidad del agua* para comprobar que los beneficios aportados por los cambios aplicados en este escenario son los más modestos. Por lo tanto, parecen equiparados resultados obtenidos con costes.

No obstante, con el cálculo de una serie de ratios, se comprueba que no es así:

Escenario de actuación	Reducción total de volumen de inundación (litros)	Reducción relativa de volumen de inundación (litros/litros)	Coste total (€)	Coste relativo a la rehabilitación convencional (€/€)	R1 (litros/€)	R2 -
E1	151000	0,50	417138,39	2,07	0,36	0,24
E2	189000	0,62	564683,33	2,80	0,33	0,22
E3	264000	0,87	1467531,96	7,28	0,18	0,12
E4	296000	0,98	1669665,48	8,28	0,18	0,12

Tabla 12: Resumen del cálculo de ratios de rentabilidad de las inversiones para cada uno de los escenarios planteados, en relación a la cantidad de escorrentía.

El ratio R1 se calcula como la relación entre los litros totales de inundación que se reducen en cada escenario y el coste total en € del mismo. El ratio R2 en cambio relaciona el factor “reducción del volumen de inundación / volumen de inundación del Escenario 0” con el factor “coste del escenario / coste de la rehabilitación convencional”.

Se observa que los Escenarios 3 y 4 son similarmente rentables en cuanto a cantidad, aunque tanto los Escenario 1 como 2 son aproximadamente el doble de rentables que estos, siendo el Escenario 1 el más rentable de todos. El término rentabilidad se asocia, en este caso a un menor coste por litro de inundación reducido.

Del mismo modo, si se calculan los ratios entre la reducción de masa contaminante por cada escenario y su respectivo coste se comprueba lo siguiente:

Escenario de actuación	Reducción total de masa de contaminante	Reducción relativa de masa de contaminante	Coste total	Coste relativo a la rehabilitación convencional	R3	R4
	(kg)	(kg/kg)	(€)	(€/€)	(kg/€)*100	-
E1	171,906	0,24	417138,39	2,07	0,41	0,12
E2	278,984	0,39	564683,33	2,80	0,49	0,14
E3	436,042	0,61	1467531,96	7,28	0,30	0,08
E4	535,062	0,74	1669665,48	8,28	0,32	0,09

**Tabla 13:** Resumen del cálculo de ratios de rentabilidad de las inversiones para cada uno de los escenarios planteados, en relación a la calidad de escurrimiento.

El ratio R3 se calcula como la relación entre los kilogramos totales de contaminante que se reducen en cada escenario y el coste total en € del mismo. El ratio R4 en cambio relaciona el factor “reducción de la masa de contaminante / masa de contaminante total” con el factor “coste del escenario / coste de la rehabilitación convencional”.

De nuevo, Escenarios 3 y 4 son los menos rentables y los Escenarios 1 y 2 les superan de manera clara. Sin embargo, la rentabilidad en cuanto a la calidad de escurrimiento es mayor en el Escenario 2 que en el resto. La rentabilidad en este caso se refiere a un menor coste por kg total de contaminante eliminado por los LIDs. De manera global se puede concluir que existen dos grupos de actuación LID: los de inversión moderada y los de inversión alta; los primeros serán más eficientes a la hora de invertir el capital en mejoras para la red de drenaje y los segundos proporcionarán excelentes resultados en términos totales.

Es importante resaltar que la eliminación de carga contaminante vertida no se suele evaluar nunca con una lluvia de proyecto, sino considerando una serie de lluvias temporal de un año, o más. Entonces se puede evaluar la reducción de carga vertida anual. Por lo tanto, los datos que se sacan con la lluvia de proyecto pueden no ser muy representativos y sirven, en este caso, como dato orientativo.

En definitiva, se puede concluir que, en función de si se buscan resultados totales o si se busca un mayor aprovechamiento de la inversión realizada, el tipo de actuación más conveniente variará. La decisión dependerá también de cuáles son las prioridades y necesidades de la institución encargada de tomar decisiones sobre la red de drenaje:

- Para obtener unos beneficios absolutos excelentes y disfrutar del máximo potencial de un drenaje urbano sostenible se deberá optar por una solución similar al Escenario 4; siempre que se pueda hacer frente a unos costes desorbitados. Se deberá tener en cuenta también que la implantación de las técnicas, probablemente, tenga que ser progresiva y que el escenario final se obtendrá en cuestión de años; será necesario impulsar una campaña de concienciación y educación y encarar un proceso de obras por toda la ciudad que remodelará su paisaje al completo.
- Si la inversión total está más limitada y se pretende que cada € invertido colabore en mejorar lo máximo posible el sistema de drenaje, una alternativa parecida al Escenario 2

puede ser una buena opción. En este caso los resultados tampoco serán inmediatos, aunque sí más rápidos que en la opción anterior.

- Finalmente, si el presupuesto de que se dispone es escaso, se requiere de una actuación inminente en la red de drenaje y los problemas de inundación están siendo constantes y altamente perjudiciales para la ciudad y sus habitantes, una rehabilitación de tipo convencional será la opción más sensata. Por otro lado, se debe tener consciencia de que no se va a obtener ningún beneficio en términos de mejora de la calidad de la escorrentia.

## 8. Conclusiones

La problemática específica de las redes de drenaje urbano en gran parte del territorio español, y especialmente en la fachada mediterránea nororiental de la Península Ibérica, es la falta de capacidad de sus colectores ante eventos de lluvia importantes. Las infraestructuras de alcantarillado de que disponen los núcleos urbanos están, en numerosos casos infra-dimensionadas; ya sea bien por haber sido diseñadas para un periodo de retorno insuficiente- o por haber quedado obsoletas ante la expansión urbanística en la cuenca de aporte y el aumento de escorrentía asociado. Estos eventos de fallo de la red de drenaje urbano son especialmente abundantes y acentuados en cuencas hidrográficas que combinan áreas urbanizadas con un elevado grado de impermeabilidad y eventos de lluvia de muy alta intensidad en cortos periodos de tiempo. La insuficiencia de capacidad de los sistemas de recolección de aguas pluviales plantea un escenario de inundación de calles y zonas comunes que conlleva daños materiales, personales y medioambientales.

Ante esta situación aparecen las técnicas de drenaje urbano sostenible o de Low Impact Development (LIDs), que abogan por un cambio radical del enfoque tradicional del drenaje urbano y apostar por favorecer la retención e infiltración de la escorrentía; el drenaje de las aguas pluviales pasaría a formar parte de lo que se llama la gestión integrada del agua pluvial. Los LID agrupan una serie de técnicas concretas que permiten reducir la escorrentía superficial en las calles, y así ajustar la hidrología urbana a la natural. Existen LIDs de muchos tipos, superficiales o soterrados, con vegetación o sin, etc. Estas pueden perfectamente trabajar de manera conjunta con las redes de alcantarillado existentes, por lo que son totalmente compatibles con métodos de drenaje urbano convencionales. Su función a corto plazo es, por lo tanto, la de colaborar en una gestión más eficiente y sostenible de las aguas pluviales. Sin embargo, existe cierto escepticismo acerca de esta cuestión y los datos reales de que se disponen son aún escasos para sacar conclusiones fiables y generalizables para cualquier caso.

La bibliografía existente, a día de hoy, sobre la materia se centra en la eficiencia de las técnicas de drenaje sostenible para retener e infiltrar escorrentía. En cambio, es poco común el estudio de qué cantidad de superficie física, esfuerzo institucional e inversión económica es necesaria a escala de ciudad para que el beneficio sea comparable al de una rehabilitación convencional. No está comprobado aún que el balance final de sea positivo, es decir, que su coste se vea compensado por el valor añadido a escala de cuenca. Por ello, el objetivo ha sido abordar la discusión en relación al cambio de paradigma en el drenaje urbano desde un punto de vista global; concentrando la atención en el beneficio o perjuicio aportado a la ciudad en su conjunto.

Para ello, se ha llevado a cabo el análisis del proceso de rehabilitación de una cuenca urbana de la ciudad de Granollers mediante ambas, técnicas convencionales y LID. Se realizó la simulación del proceso precipitación-escorrentía en la cuenca con el software SWMM 5.1. Se han propuesto 4 escenarios de actuación; a medida que se avanza en ellos, las técnicas LID crecen en número y sofisticación. De este modo, es posible discernir a qué escala se debe plantear el cambio de paradigma en el drenaje pluvial urbano para que los efectos sean lo suficientemente notorios como para descartar una rehabilitación convencional de la red de alcantarillado. Por otro lado, se ha realizado una comparación en términos económicos de cada uno de los escenarios plantados con una rehabilitación de tipo convencional de la red de colectores existente.

Después de analizar los resultados concretos de cada uno de los escenarios y contrastar la capacidad de reducción del volumen de inundación y contaminantes con el coste de cada uno de los escenarios se puede llegar a las siguientes conclusiones:

- A pesar de tener sus detractores, la consideración de las técnicas LID como una alternativa real para el drenaje urbano es algo necesario. Se ha demostrado que, a diferencia de como ciertos analistas defendían, las técnicas de drenaje urbano sostenible sí son capaces de tener un papel determinante ante eventos de lluvia torrencial. Por lo tanto, ante un trabajo de rehabilitación de la red de alcantarillado, será siempre positivo un análisis como el aquí efectuado; un cálculo hidrológico - hidráulico de las posibilidades de los elementos LID de retener e infiltrar la escorrentía que no son capaces de evacuar los colectores y la cuantificación de los costes asociados.
- El análisis deberá ser siempre particularizado a la cuenca de estudio para cada caso concreto. Se recalca que el análisis aquí efectuado corresponde a una cuenca concreta y real y que, por lo tanto, los resultados presentados son específicos y no transferibles a otros escenarios. El propósito de los resultados que se presentan en este trabajo es meramente orientativo e informativo; se intentan despejar dudas acerca de las capacidades del drenaje urbano sostenible.
- El estudio deberá realizarse a diferentes escalas de implementación LID. La propuesta de diferentes escenarios, que plasman diferentes grados de implicación en la transformación de sistema de drenaje, permitirá descubrir cuál es el grado de intervención necesario en la cuenca de estudio. Esto facilita en gran medida la toma de decisiones y, al mismo tiempo, denota cuáles son las técnicas LID que mejor se adaptan a las características de la cuenca y que, por tanto, mayor beneficio aportan.
- Una intervención en la cuenca con elementos LID ha demostrado ser ciertamente costosa. Por lo tanto, en función de si se buscan resultados totales o si se busca un mayor aprovechamiento de la inversión realizada, el tipo de actuación más conveniente variará. La decisión dependerá también de cuáles son las prioridades y necesidades de la institución encargada de tomar decisiones sobre la red de drenaje.
- En el caso de una nueva urbanización se deberá siempre apostar, en la medida de lo posible, por la incorporación de elementos LID. En este caso desaparecen problemas como la falta de espacio en superficie, la necesidad de demoler infraestructuras preexistentes o reforzar las estructuras de edificios para poder albergar tejados verdes. El dimensionamiento del sistema de drenaje teniendo en cuenta las técnicas LID desde un principio permite aprovechar mucho más su máximo potencial que en trabajos de rehabilitación.

En definitiva, las técnicas LID han venido para quedarse como otra opción más que el técnico responsable del drenaje urbano debe considerar. Si hasta ahora el 100% de las actuaciones suelen ser de tipo sustitución de colectores antiguos por otros de más capacidad, se deberían incorporar progresivamente, en la medida de lo posible, estas técnicas considerando siempre los costes reales.

## Referencias bibliográficas

- Aire, C., Calderón, Y., Charca, J., & Yanqui, C. (2016). Estudio del comportamiento frente a la colmatación de hormigón poroso fabricado con áridos naturales y reciclados. San José, Costa Rica: International Concrete Sustainability Conference.
- Altarejos, L. (15 de Septiembre de 2007). Aplicación de sistemas de drenaje urbano sostenible en el desarrollo urbanístico de Paterna (Valencia). *Diario Levante*, págs. 1-20.
- Andrés, V., Castro, D., Sañudo, L. A., Rodríguez, J., Ballester, F., & Canteras, J. C. (2014). Rehabilitación hidrológica urbana. (págs. 291-298). Santander: Congreso Latinoamericano REHABEND.
- Arnold, C. L., & Gibbons, J. (1996). Impervious surface Coverage: The emergence of a key environmental indicator. *Journal Of The American Planning Association*, 62(2), 243-258.
- Arranz, M. (2008). El riesgo de inundaciones y la vulnerabilidad en áreas urbanas. Análisis de casos en España. *Estudios Geográficos*, 69(265), 385-416.
- Arrowstreet, CBA Landscape Architects, Kalin Associates. (October de 2009). *Green Roof Planning Study for the City of Boston*. Boston: ARROWSTREET.
- Beecham, S., Pezzaniti, D., Shackel, B., Myers, B., & Pearson, A. (2009). Experience in the application of Permeable interlocking concrete paving in Australia. (págs. 1-8). Buenos Aires: 9th International Conference on Concrete Block Paving.
- Borgwardt, S. (2006). Long-term in-situ infiltration performance of permeable concrete block pavement. (págs. 149-160). San Francisco: 8th International Conference on Concrete Block Paving.
- Brown, R., & Clarke, J. (2007). *Transition to Water Sensitive Urban Design: The Story of Melbourne, Australia*. MONASH University. Victoria, Australia: National Urban Water Governance Program.
- Casas, M. C., & Redaño, Á. (1995). *Análisis espacial y temporal de las lluvias extremas en Catalunya. Modelización y clasificación objetiva*. Universitat de Barcelona, Departament d'Astronomia i Meteorologia. Barcelona: Programa de doctorado en Astronomía y Metereología.
- Chaosakul, T., Koottatep, T., & Irvine, N. (2013). Low Impact Development Modeling to Assess Localized Flood Reduction in Thailand. *Journal of Water Management Modeling*(R246-18), 337-353.
- Chow, V. T. (1988). *Applied Hidrology*. Singapore: McGraw-Hill.
- CIRIA. (2015). *The SuDS Manual*. London: CIRIA.
- Conesa García, C., & García García, E. (2003). Las áreas históricas de inundación en Cartagena: Problemas de drenaje y actuaciones. *Boletín de la A.G.E.N.*(35), 79-100.



- Davis, A. (2008). Field performance of bioretention: Hydrology impacts. *Journal of Hydrologic Engineering*, 13(2), 90-95.
- Dietz, M. E. (2007). Low Impact Development Practices: A Review of Current Research and Recommendations for Future Directions. *Water Air Soil Pollut*(186), 351-363.
- Dolz, J., & Gómez, M. (1994). Problemática del drenaje de aguas pluviales en zonas urbanas y el estudio hidráulico de las redes de colectores. *Ingeniería del Agua*, 1(1), 55-66.
- Febles, M., Perales, S., & Soto, R. (2009). Innovación y Sostenibilidad en la gestión del drenaje urbano: Primeras experiencias de SuDS en la ciudad de Barcelona. Madrid: Jornadas de Ingeniería del Agua 2009.
- Fletcher, T. D., Shuster, W., Hunt, W. F., Ashley, R., Butler, D., Aarthur, S., . . . Uhl, M. (2015). SUDS, LID, BMPs, WSUD and more - The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. *Urban Water Journal*, 12(7), 525-542.
- Gago Lara, M. Á. (2010). Depósitos de tormenta y balsas de laminación en el Área Metropolitana de Barcelona. *Cimbra: Revista del Colegio de Ingenieros Técnicos de Obras Públicas*(392), 54-61.
- Gao, C., Liu, J., & Wang, Z. (2013). Review of current research on Urban Low-Impact Development Practices. *Research Journal of Chemistry and Environment*, 17(S1), 209-214.
- García, J. L., Álvarez, M., & Sánchez, J. V. (2006). Presiones e impactos derivados del desarrollo urbanístico en cuencas periurbanas. Zaragoza: III Congreso de Ingeniería Civil, Territorio y Medio Ambiente.
- Gómez, M. (2007). *Hidrología Urbana*. Barcelona: flumen.
- Gómez, M., & Russo, B. (2009). Criterios de riesgo asociados a escorrentía urbana. Madrid: Jornadas de Ingeniería del Agua.
- Guijarro, J. A. (2002). Tendencias de la precipitación en el litoral mediterráneo español. *El agua y el clima, Ser A*(3), 237-246.
- Hager, M. C. (2003). *Low-Impact Development*. Recuperado el 22 de Junio de 2016, de [http://www.lowimpactdevelopment.org/lid%20articles/stormwater\\_feb2003.pdf](http://www.lowimpactdevelopment.org/lid%20articles/stormwater_feb2003.pdf)
- Higueras, E. (2013). La gestión eficaz de los recursos naturales para disminuir los impactos negativos de la urbanización. Madrid: E.T.S. Arquitectura (UPM).
- Hunt, W. F., Passeport, E., & Brown, R. A. (2008). Water Quality and Hydrologic Benefits of Five Bioretention Cells in North Carolina, USA. (págs. 1-9). Edinburgh: 11th International Conference on Urban Drainage.
- Jansà, J. M. (1969). *Curso de climatología*. Madrid: Instituto Nacional de Metereología.
- Jones, D., & JHA, M. K. (7-9 de November de 2009). Green Infrastructure: Assesing the Benefits of Bioretention over Traditional Stormwater Management. (págs. 134-141).

- Baltimore: 2nd World Scientific and Engineering Academy and Society International Conference on Natural Hazards, Morgan State University.
- Karasawa, A., & Suda, S. (1996). Characteristics of new type permeable concrete block paving system. (págs. 613-622). Tel Aviv: International Conference PAVE ISRAEL, 96.
- Lara, Á., & Prieto, A. (2014). Integración de sistemas urbanos de drenaje sostenible en la rehabilitación del espacio urbano. Convocatoria de Comunicaciones u 2º Bienal de Proyectos de Edificación y Urbanismo.
- Lepe, A. (2002). El planeta, la vida, el agua y la ciudad. *URBANO*, 5(6), 21-27.
- López-Bustins, J. A., Sánchez-Lorenzo, A., Molina-Azorín, C., & Ordoñez-López, A. (2008). Tendencias de la precipitación invernal en la fachada oriental de la Península Ibérica. *Cambio climático Regional y sus Impactos, Serie A*(6), 161-171.
- Mailhor, A., & Duchesne, S. (March/April de 2010). Design criteria of urban drainage infrastructures under climate change. *Journal of water resources planning and management*, 136(2), 201-206.
- Martín Vide, J. (1995). La pluviometría en Cataluña. *Butlletí de la Societat Catalana de Ciències*, 15(1), 135-141.
- Munby, B., & Stovin, V. (2005). Feasibility Study for the Retrofitting of Green Roofs. Sheffield: University of Sheffield, Department of Civil and Structural Engineering.
- Nisenso, L. (2006). Using Smart Growth Techniques as Stormwater Best Management Practices. Washington, D.C.: United States Environmental Protection Agency.
- Olcina, J. (2009). Prevención de riesgos: cambio climático, sequías e inundaciones. (pág. 41). Panel Científico-Técnico de Seguimiento de la Política de Aguas. Fundación Nueva Cultura del Agua. Convenio Universidad de Sevilla-Ministerio de Medio Ambiente.
- Perales, S. (2008). Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS). Zaragoza: EXPO ZARAGOZA 2008- 4. Capacidad tecnológica, condicionantes y soluciones.
- Perales, S., & Andrés-Doménech, I. (2007). Los sistemas urbanos de drenaje sostenible: Una alternativa a la gestión del agua de lluvia. *Revista Técnica de Medio Ambiente RETEMA.C&M Publicaciones*, XX1(124), 92-104.
- Perales, S., Álvarez, J.-A., & Andrés-Doménech, I. (2015). A regenerative urban stormwater management methodology. The role of SUDS construction and monitoring in the transition of a mediterranean city. *Programa de doctorado de ingeniería del agua y medioambiental*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Piñeiro, J., Maestro, I., Suárez, J., Puertas, J., & Anta, J. (2008). Colectores generales del Miño en Lugo: un sistema integral de saneamiento en medio fluvial. Madrid: Jornadas de Ingeniería del Agua. IAHR - CEDEX.
- Poleto, C. (2011). SUDS, Uma contextualização histórica. *Revista Thema*, 8(01), 1-12.

- Pujadas, M. (2016). *Casos pràctics. El servei municipal de clavegueram de Granollers*. Granollers: DRENATGES URBANS DEL BESÒS, S.L.
- Quereda, J., & Montón, E. (1996). Temporales de levante en la fachada mediterránea española: ¿Sucesos imprevisibles? Alicante: Jornadas científicas sobre "Riesgos Naturales en la Comunidad Valenciana".
- Quereda, J., Montón, E., & Escrig, J. (1999). La evolución de las precipitaciones en la cuenca occidental del Mediterráneo: ¿Tendencia o ciclos? Alicante: Jornadas Científicas sobre "Sequías en España".
- Revitt, M., Ellis, B., & L., S. (2003). Report 5.1. Review of the use of sormwater BMPs in Europe. (M. University, Ed.) Daywater.
- Riccardi, G. A. (1997). La transformación lluvia-caudal en ambientes rurales y urbanos. Los procesos hidrológicos y el modelado. *Cuadernos del Curiham*(4), 69-87.
- Rivera, Á. (1990). Las situaciones de lluvias torrenciales en el área mediterránea española y el Plan PREVIMET. *La Meteorología en el mundo iberoamericano*(2), 29-39.
- Rodríguez, J., Rodríguez, J., Gómez-Ullate, E., & Castro, D. (2006). Sistemas urbanos de drenaje sostenible. SUDS. Santander: XXXIII Congreso Nacional de Parques y Jardines Públicos (PARJAP 2006) Una nueva sociedad, un nuevo paisaje.
- Rodriguez, J., Rogríquez, J., Castro, D., Calzada, M. A., Canteras, J. C., Ballester, F., . . . Lasa, P. (2006). Construcción de pavimentos permeables para el control en origen de la escorrentía urbana: Ejemplo práctico del aparcamiento del Palacio de Deportes de la Guía. Zaragoza: III Congreso de Ingeniería Civil, Territorio y Medio Ambiente. Agua, Biodiversidad e Ingeniería.
- Romero, H., & Vázquez, A. (2005). Evaluación ambiental del proceso de urbanización de las cuencas del piedemonte andino de Santiago de Chile. *eure*, 31(94), 97-118.
- Rossman, L. (2015). *Storm Water Management Model Reference Manual* (Vols. I - Hydrology). Cincinnati: U.S. Environmental Protection Agency.
- Rossman, L. (2015). *Storm Water Management Model User's Manual Version 5.1*. Cincinnati: Environmental Protection Agency.
- Russo, B., Pouget, L., Malgrat, P., & J., G. (2011). Evaluación del impacto del cambio climático en un caso de estudio de Barcelona a través de una modelización 2D-1D del drenaje dual. Barcelona: II Jornadas de Ingeniería del Agua.
- Sañudo-Fontaneda, L., Rodriguez-Hernandez, J., Vega-Zamanillo, A., & Castro-Fresno, D. (2013). Laboratory analysis of the infiltration capacity of interlocking concrete block pavements in car parks. *Water, Science and Technology*, 67(3), 675-681.
- Seco, I., & Gómez, M. (2014). In-sewer organic sediment transport. *Civil Engineering Doctoral Programme*. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya. BarcelonaTech.
- Shamsi, U. M. (2012). Modeling Rain Garden LID Impacts on Sewer Overflows. *CHI Journal of Water Management Modeling*(R245-07), 113-126.

- Soriano, L. (2012). Estrategias integradas para la gestión sostenible de aguas de lluvia en áreas metropolitanas. Madrid: Congreso Nacional del Medio Ambiente.
- Suárez Máyer, P. (2002). Desarrollo urbano e inundaciones de Las Palmas de Gran Canaria. *Investigaciones Geográficas*(28), 145-159.
- Suárez, J., Puertas, J., Anta, J., Jácome, A., & Álvarez-Campana, J. (2014). Gestión integrada de los recursos hídricos en el sistema del agua urbana: Desarrollo Urbano Sensible al Agua como enfoque estratégico. *Ingeniería del agua*, 18(1), 107-119.
- Sun, Y.-W., Wei, X.-M., & Pomeroy, C. (2011). Global analysis of sensitivity of bioretention cell design elements to hydrologic performance. *Water Science and Engineering*, 4(3), 246-257.
- Thévenot, D. (2008). *DayWater: an adaptive decision support system for urban stormwater management*. London: IWA Publishing.
- Valls, G., & Perales, S. (2008). Integración de las aguas pluviales en el paisaje urbano. Un valor social a fomentar. Bilbao: I Congreso Nacional de Urbanismo y Ordenación del Territorio.
- Vázquez, L. (1998). La pluviometría de las comarcas catalanas próximas al mar. *Territoris*(1), 291-309.
- Velasco, M., Cabello, A., & Russo, B. (2015). Análisis coste beneficio de medidas de adaptación para reducir los impactos del cambio global en inundaciones urbanas: aplicación en el caso de estudio de Barcelona. Córdoba: IV Jornadas de Ingeniería del Agua. La precipitación y los procesos erosivos.
- Vidal, C., & Romero, H. (2010). Efectos ambientales de la urbanización de las cuencas de los ríos Bío-Bío Y Andalién sobre los riesgos de inundación y anegamiento de la ciudad de Concepción. *Concepción Metropolitano (AMC). Planes, Procesos y Proyectos*, 123-149.
- Vide, J. M., & Llasat, M. C. (2000). Las precipitaciones torrenciales en Cataluña. *Serie Geográfica*(9), 17-26.
- Weinstein, N., P.E., R.L.A., & AICP. (2005). New directions in Low Impact Development: Implications for urban development. Copenhagen: 10th International Conference on Urban Drainage.
- Wong, T. (2006). Australian Runoff Quality. Sydney: Institution of Engineers, Australia.
- Zimmer, C., Heathcote, I., Whiteley, H., & Schroeter, H. (2007). Low-Impact-Development practices for Stormwater: Implications for Urban Hydrology. *Canadian Water Resources Journal*(32), 193-212.

